



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

Departamento de Ingeniería Mecánica

**Estudio del efecto de la carga en
rodamientos defectuosos**

INGENIRARÍA INDUSTRIAL
PROYECTO FIN DE CARRERA

Leganés, Octubre de 2.010

Autor: Francisco Ros Rodríguez
Tutores: Alberto Ordoñez Rangel
Cristina Castejón Sisamón

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	8
1.1. Introducción	8
1.2. Objetivo del proyecto	10
1.3. Desarrollo y organización del proyecto	10
2. CONTEXTO TEÓRICO	12
2.1. Vibraciones en rodamientos defectuosos.....	12
2.2. Transformada de Fourier	15
2.3. Transformada de Hilbert-Huang.....	17
2.3.1 Descomposición modal empírica.....	18
2.3.2. Análisis espectral de Hilbert.....	21
3. SISTEMA EXPERIMENTAL	23
3.1. Descripción del equipo experimental.....	23
3.1.1. Banco de ensayos.....	23
3.1.2. Rodamientos	24
3.1.3. Configuraciones de carga	25
3.1.4. Medición, amplificación y filtrado de la señal.....	29
3.1.5. Adquisición y almacenamiento de los datos	30
3.1.6. Montaje de las configuraciones ensayadas	33
3.2. Frecuencia de muestreo y número de muestras necesarias	35
3.3. Frecuencia de defecto de los rodamientos	36
3.4. Nomenclatura de las señales adquiridas.....	36
4. ANÁLISIS EXPERIMENTAL	38
4.1. Selección del eje de estudio de las señales.....	39
4.1.1. Rodamiento normal.....	39
4.1.2. Rodamiento con defecto en bola	41
4.1.3. Rodamiento con defecto en pista interna	42
4.1.4. Rodamiento con defecto en pista externa.....	43
4.1.5. Selección del eje de estudio	44
4.2. Análisis descriptivo de las señales	45
4.2.1. Rodamiento normal.....	45
4.2.2. Rodamiento con defecto en bola	46
4.2.3. Rodamiento con defecto en pista interna	47
4.2.4. Rodamiento con defecto en pista externa.....	49
4.3. Análisis de la variación de carga	50
4.3.1. Rodamiento normal.....	51
4.3.2. Rodamiento con defecto en bola	54
4.3.3. Rodamiento con defecto en pista interna	56



4.3.4 Rodamiento con defecto en pista externa.....	58
4.4. Análisis de amplitudes según la variación de velocidad.....	59
5. CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS	63
5.1. Conclusiones.....	63
5.2. Futuros desarrollos.....	65
6. BIBLIOGRAFÍA	67
ANEXOS	69
Anexo A. Catálogo del rodamiento	69
Anexo B. Tablas de los resultados de los análisis	71



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Evolución del nivel de vibración en una máquina.....	8
Figura 2.2. Análisis tiempo-frecuencia para varias señales.....	16
Figura 2.3. Ejemplo del proceso “ <i>Shifting</i> ” en su primera iteración.....	19
Figura 2.4. Descomposición Modal Empírica de una señal.....	21
Figura 3.5. La MFS de SpectraQuest utilizada para realizar las medidas.....	23
Figura 3.6. Rodamiento ER16K.....	24
Figura 3.7. Ejemplo de rodamientos con defectos en pista interna.....	25
Figura 3.8. Ejemplo de rodamientos con defecto en pista externa.....	25
Figura 3.9. Ejemplo de rodamientos con defecto en bola.....	25
Figura 3.10. Configuración de la MFS en media carga.....	26
Figura 3.11. Configuración de la MFS en baja carga.....	27
Figura 3.12. Cálculo de cargas en los rodamientos.....	27
Figura 3.13. Acelerómetro triaxial K5943B de Brüel&Kjaer en la carcasa del rodamiento.....	29
Figura 3.14. Amplificadores usados en la realización del ensayo.....	30
Figura 3.15. Tarjeta de adquisición de datos Keithley KUSB-3100.....	31
Figura 3.16. Programa de adquisición de datos Test Point.....	32
Figura 3.17. Cadena de medida para el banco de ensayos de rodamientos.....	32
Figura 3.18. Llaves hexagonales que se usaron en el montaje.....	33
Figura 3.19. Montaje del eje y de los rodamientos.....	34
Figura 3.20. Montaje completo de la parte de medición, amplificación, filtrado, adquisición y almacenamiento de las señales tomadas.....	34
Figura 4.21. Espectro de frecuencias de la señal “ <i>a10n</i> ” en ejes X-Y.....	40
Figura 4.22. Espectro de frecuencias de la señal “ <i>m30b</i> ” en ejes X-Y.....	41
Figura 4.23. Espectro de frecuencias de la señal “ <i>a20i</i> ” en ejes X-Y.....	42
Figura 4.24. Espectro de frecuencias de la señal “ <i>b30e</i> ” en ejes X-Y.....	43
Figura 4.25. Espectro de frecuencias de las señales “ <i>a10n</i> ”, “ <i>m10n</i> ” y “ <i>b10n</i> ”.....	45
Figura 4.26. Espectro de frecuencias de las señales “ <i>a20b</i> ”, “ <i>m20b</i> ” y “ <i>b20b</i> ”.....	46
Figura 4.27. Espectro de frecuencias de las señales “ <i>a10i</i> ”, “ <i>m10i</i> ” y “ <i>b10i</i> ”.....	47
Figura 4.28. Espectro de frecuencias de las señales “ <i>a30e</i> ”, “ <i>m30e</i> ” y “ <i>b30e</i> ”.....	49
Figura 4.29. Gráficas Amplitud-Frecuencia del rodamiento normal a diferentes velocidades de giro.....	52
Figura 4.30. Gráficas Amplitud-Frecuencia del rodamiento con defecto en bola a diferentes velocidades de giro.....	54
Figura 4.31. Gráficas Amplitud-Frecuencia del rodamiento con defecto en pista interna a diferentes velocidades.....	56



- ÍNDICE -

Figura 4.32. Gráficas Amplitud-Frecuencia del rodamiento con defecto en pista interna a diferentes velocidades.....	58
Figura 4.33. Gráfico de amplitud en función de la velocidad para el rodamiento normal para la frecuencia del doble de la de red.....	60
Figura 4.34. Gráfico de amplitud en función de la velocidad para el rodamiento con defecto en bola para la frecuencia BSF/3.....	61
Figura 4.35. Gráfico de amplitud en función de la velocidad para el rodamiento con defecto en pista interna para la frecuencia BPTI.....	62



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Parámetros del rodamiento ER16K.....	24
Tabla 3.2. Reacción en el rodamiento en las tres configuraciones de carga.....	28
Tabla 3.3. Número de muestras necesarias para cada velocidad.....	35
Tabla 3.4. Frecuencias de defecto de los rodamientos.....	36
Tabla 4.5. Toma de datos de las señales “ <i>b20i</i> ”, “ <i>m20i</i> ” y “ <i>a20i</i> ”.....	51

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

Las máquinas que forman parte de los procesos industriales más habituales se someten a requerimientos mecánicos intensos, y a pesar de que se fabrican bajo parámetros de diseño exigentes, es común el desarrollo de defectos en sus componentes. Cabe destacar la criticidad de rodamientos en sistemas mecánicos rotativos convencionales, ya que son una de las principales causas de defectos en éstos.

El deterioro y colapso de un sistema mecánico viene seguido de un aumento en la señal de vibración, que suele tomarse como indicadora del estado de la máquina. En la curva en forma de “bañera” de la figura 1.1 se muestra la evolución típica de las vibraciones durante el ciclo de funcionamiento de una máquina [1].

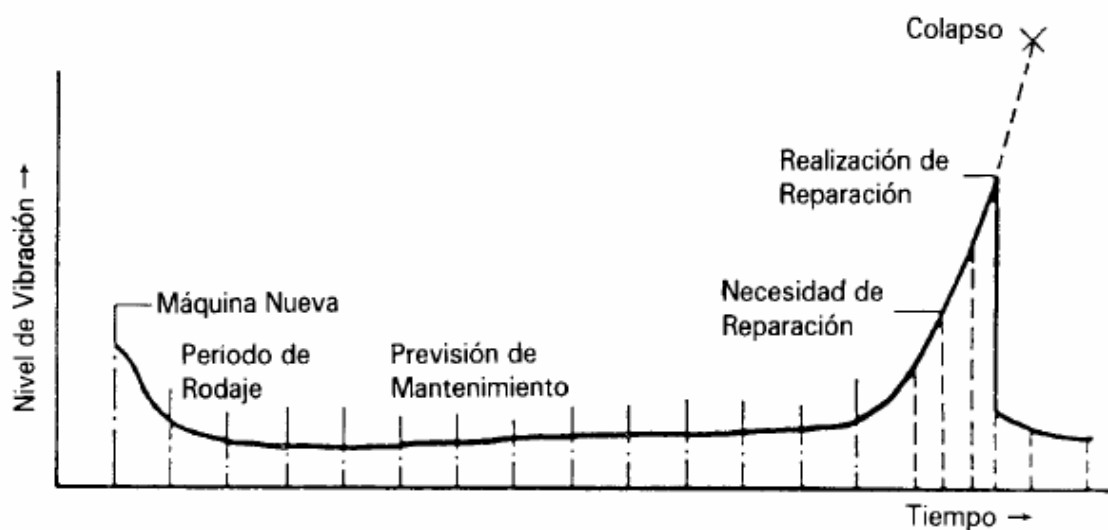


Figura 1.1. Evolución del nivel de vibración en una máquina [1]

Para evitar llegar al colapso total de la máquina se debe llevar a cabo el mantenimiento de la misma. Habitualmente los tipos de mantenimiento se clasifican de la siguiente manera:



- CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN -

- **Mantenimiento correctivo** es aquel en el que se sustituyen las piezas en el momento en el que éstas fallan.
- **Mantenimiento preventivo** es aquel en el que se sustituyen las piezas cada cierto tiempo, independientemente de que éstas estén o no dañadas, la principal ventaja de este mantenimiento frente al correctivo es que se evitan paradas imprevistas y con ello pérdidas por paradas de producción, la principal desventaja es que en muchas ocasiones se desperdician piezas que podrían haber seguido funcionando durante más tiempo.
- **Mantenimiento predictivo** es aquel en el que se realizan ciertas medidas para determinar cuando un elemento va a fallar y, en el momento en el que sea necesario, se programa una parada para su sustitución.

En los últimos años se está tendiendo cada vez más a un mantenimiento predictivo, ya que aúna las ventajas de los otros dos tipos de mantenimiento, no se sustituyen piezas cuyo funcionamiento es correcto y se pueden programar las paradas para disminuir la repercusión de éstas.

Es bien sabido que la mayoría de las máquinas en la industria se diseñan con el fin de que el primer elemento que falle sean los rodamientos, ya que son elementos fácilmente sustituibles y de bajo coste. Por lo tanto, resulta de vital importancia conocer, no sólo cuando su funcionamiento no es el adecuado sino además dónde se localiza el defecto, para así poder evaluar con la mayor precisión posible la gravedad de la avería y programar la sustitución de estos elementos [2].



1.2. Objetivo del proyecto

Este proyecto se encuadra en el mantenimiento de los rodamientos de las máquinas y se pretende estudiar los niveles de vibración de los mismos con y sin defectos a diferente nivel de carga y a diferente velocidad de giro. Se realizará un análisis con la transformada de Hilbert-Huang que permite el tratamiento de señales no estacionarias, para a continuación hacer un estudio estadístico de los niveles de vibración obtenidos en los distintos niveles de carga y de velocidad.

1.3. Desarrollo y organización del proyecto

El documento se organiza de la siguiente manera:

En el presente capítulo se expone la motivación del proyecto en una pequeña introducción, se comentan los objetivos y se explica cómo se organizará el proyecto.

En el siguiente capítulo, el segundo, se explicarán los conceptos teóricos necesarios para la realización del proyecto, tales como el comportamiento en vibración de los rodamientos defectuosos y las transformadas de Fourier y Hilbert-Huang.

Después, en el tercer capítulo, se detallará como se realizaron los ensayos en una máquina situada en la Universidad Carlos III de Madrid para obtener las señales de los rodamientos objeto de estudio. Se realizaron ensayos con cuatro condiciones de rodamientos (sin defecto, con defecto en bola, con defecto en pista interna y con defecto en pista externa) a tres velocidades (600 rpm, 1200 rpm y 1800 rpm) y con tres cargas distintas (alta, media y baja). Todas estas señales se almacenaron tanto para el eje X como el Y.

En el cuarto capítulo, se estudiarán las señales obtenidas en los ensayos mediante la transformada de Hilbert-Huang. Primero se escogerá el eje en el que se tomarán las amplitudes de las frecuencias importantes de cada señal y después se realizará un análisis para determinar las frecuencias más significativas de las señales vibratorias. Por



- CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN -

último en este capítulo se realizará un estudio estadístico con dichos datos para comparar las vibraciones de los rodamientos defectuosos en función de la carga y la velocidad a la que giraban.

Por último se expondrán las conclusiones obtenidas del proyecto y se propondrán los futuros desarrollos del estudio de las vibraciones en los rodamientos defectuosos.

2. CONTEXTO TEÓRICO

En este apartado se expondrá una pequeña introducción teórica a las vibraciones en rodamientos y las transformadas utilizadas durante el desarrollo del proyecto.

2.1. Vibraciones en rodamientos defectuosos

El hecho de que la distribución de cargas varíe conforme los elementos rodantes giren sobre los anillos causa que los rodamientos se comporten como generadores de vibraciones, incluso aunque éstos no tengan ningún defecto. Sin embargo, la presencia de defectos hace que ciertas frecuencias se amplifiquen. Los defectos pueden clasificarse como localizados y distribuidos [2].

- **Defectos localizados:** el tipo más común son las grietas en las pistas o en los elementos rodantes, principalmente causados por propagación de fisuras desde la superficie por fatiga. El fallo por fatiga se ve favorecido cuando el rodamiento está sobrecargado o soporta cargas de impacto durante su funcionamiento o instalación.
- **Defectos distribuidos:** entre otros, podemos encontrar la rugosidad superficial, pistas desalineadas y elementos rodantes desiguales. Estos defectos suelen deberse a errores de fabricación o a una inadecuada instalación. La variación de las fuerzas de contacto entre los elementos rodantes y las pistas causa un incremento en el nivel de vibración.

Una vez aparece una fisura, la evolución es la siguiente:

- El primer síntoma que aparece cuando el fallo está en un estado incipiente es una vibración con componentes de alta frecuencia (habitualmente superiores a 5 kHz), en este estado no se suele sustituir los rodamientos.



- CAPÍTULO 2. CONTEXTO TEÓRICO -

- En un segundo estado, la grieta comienza a ser visible y el rodamiento produce un sonido audible y en algunos casos la temperatura aumenta. En este estado aparecen componentes espectrales en un rango de frecuencias bajas e intermedias (menos de 5 kHz), estas frecuencias suelen llamarse frecuencias características de defecto, en este estado debe programarse el cambio de los rodamientos. Las frecuencias características de defecto, para el caso particular de los rodamientos de bola, pueden clasificarse en función de donde se produce el defecto:

- **FTF** (Fundamental train frequency), es la frecuencia de rotación de la jaula que contiene los elementos rodantes.

$$FTF = \frac{f}{2} \left(1 - \frac{B_d}{D_m} \cos \alpha \right) \quad (2.1)$$

- **BPFI** (Ball pass frequency of the inner race), es la frecuencia de paso de los elementos rodantes por un defecto en la pista interna.

$$BPFI = f \cdot \frac{n}{2} \left(1 + \frac{B_d}{D_m} \cos \alpha \right) \quad (2.2)$$

- **BPFO** (Ball pass frequency of the outer race), es la frecuencia de paso de los elementos rodantes por un defecto en la pista externa.

$$BPFO = f \cdot \frac{n}{2} \left(1 - \frac{B_d}{D_m} \cos \alpha \right) \quad (2.3)$$

- **BSF** (Ball spin frequency), es la frecuencia de giro de los elementos rodantes.

$$BSF = f \cdot \frac{D_m}{2B_d} \left(1 - \frac{B_d^2}{D_m^2} \cos^2 \alpha \right) \quad (2.4)$$



- CAPÍTULO 2. CONTEXTO TEÓRICO -

Donde:

f = frecuencia de giro del anillo exterior respecto del interior

n = número de bolas del rodamiento

B_d = diámetro de las bolas del rodamiento

D_m = diámetro medio del rodamiento

α = ángulo de contacto

- En un tercer estado, cerca de la rotura catastrófica del elemento, el ruido aumenta significativamente y debe apreciarse un incremento en la temperatura, las bajas frecuencias empiezan a amplificarse y la sustitución del rodamiento debe hacerse de inmediato [3].

A la hora de estudiar estas señales vibratorias cabe preguntarse si se ha de realizar este análisis en el dominio del tiempo o en el de la frecuencia. En el dominio del tiempo se pueden obtener varios valores como la desviación típica y la Kurtosis de la señal, pero estas magnitudes no aportan gran información sobre las vibraciones de los rodamientos puesto que no ofrecen información alguna sobre las frecuencias que tiene la señal analizada, por este motivo es necesario realizar nuestros análisis en el dominio de la frecuencia.

Como se acaba de mencionar, en señales reales resulta casi imposible determinar las frecuencias que la componen mediante su representación temporal y su uso no está generalizado hoy día [4], por lo que se hace necesario un nuevo enfoque, el estudio en el dominio de la frecuencia. Para obtener el espectro en frecuencias se utilizan diferentes técnicas. A continuación se muestran los dos métodos aplicados durante la realización de este proyecto.



2.2. Transformada de Fourier

La teoría de Fourier se basa en la idea de que cualquier señal periódica puede descomponerse en una suma de senos. Esta suma de senos se denomina serie de Fourier, la descomposición en serie de Fourier de una señal cualquiera facilita en gran medida su análisis y es una técnica muy utilizada en el tratamiento de señales.

Cuando la señal es una función no periódica entra en escena la transformada de Fourier. Es evidente que cualquier función no periódica puede tratarse como una función periódica de periodo infinito, es en esta idea donde se sustenta la teoría de la transformada de Fourier, que nos permitirá descomponer nuestra señal en una suma de senos con diferentes frecuencias. Con la transformada de Fourier podemos pasar del dominio temporal al dominio en frecuencia y viceversa, mediante las ecuaciones (2.5) y (2.6).

$$\hat{s}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j\omega t} dt \quad (2.5)$$

$$s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{s}(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (2.6)$$

Donde:

\hat{s} = señal $s(t)$ en el dominio de la frecuencia

s = señal en el dominio del tiempo

ω = frecuencia

t = tiempo

De esta manera disponemos de dos formas diferentes de representar las señales, en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia. Ambas representaciones disponen de la misma información sobre la señal, siendo los enfoques completamente diferentes.

En la figura 2.2 se muestran ambas representaciones para distintas señales. Las dos primeras señales son dos senos, la frecuencia del segundo es superior a la del primero, como se puede observar en el análisis en frecuencia. La tercera señal es la suma de las dos primeras y tras aplicar la transformada de Fourier se observan las frecuencias de ambos armónicos, cuando tratamos con señales más complicadas compuestas por una gran cantidad de armónicos, el análisis en el dominio de la frecuencia nos permite distinguir las frecuencias de los armónicos principales, labor que sería casi imposible si sólo dispusiéramos del análisis temporal [2].

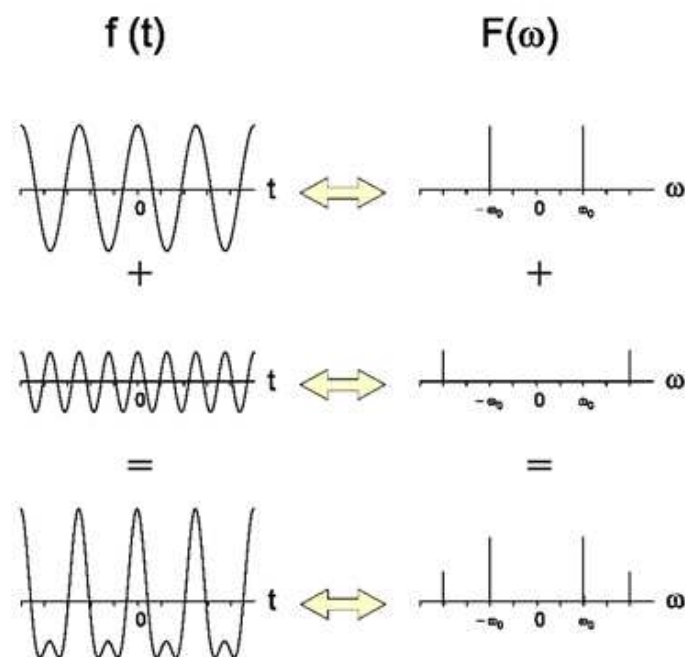


Figura 2.2. Análisis tiempo-frecuencia para varias señales [8]

2.3. Transformada de Hilbert-Huang

Ya hemos visto que se puede enfocar el análisis de la señal de vibración desde dos puntos de vista complementarios, la frecuencia y el tiempo. Ahora se plantea un problema existente en casi todas las señales físicas. ¿Qué pasa si nuestro espectro en frecuencias no es el mismo para diferentes instantes de tiempo?

En este caso nos encontraríamos ante el dilema de que existirían infinitos espectros de frecuencias para una única representación temporal, como ocurre en la señal de la vibración de un rodamiento defectuoso en funcionamiento. De modo que, si representamos la señal en el dominio del tiempo no tenemos información sobre la frecuencia, y si localizamos la señal en el dominio de la frecuencia perdemos por completo la información temporal.

Existen varios métodos para tratar conjuntos de datos no estacionarios, como por ejemplo la transformada de Wavelet que, resumiendo, está diseñada de manera que las frecuencias altas tengan mejor resolución en el tiempo porque disponemos de un mayor número de muestras para el mismo espacio de tiempo, y por otro lado, las frecuencias más bajas se intentan caracterizar correctamente en frecuencia aun a costa de perder información temporal [2]. No obstante, en este proyecto se utilizará la transformada de Hilbert-Huang para el tratamiento de la señal por lo que se explicará a continuación.

La mayoría de las señales reales procedentes de rodamientos defectuosos contienen datos no estacionarios y no lineales, para tratar este tipo de datos se requiere de un método adaptativo y la transformada de Hilbert-Huang cumple esta condición [5].

Un método adaptativo es aquel en el que la definición de la base es dependiente de los datos y por tanto se realiza a posteriori, esto rompe con los métodos tradicionales de análisis de señales.

En el caso de la transformada de Hilbert-Huang, al tratarse de un método adaptativo tiene un precio que es la dificultad de encontrar una base teórica firme. Se trata de un



método empírico que hasta el momento ha presentado en la mayoría de los casos estudiados mejores aproximaciones que los métodos tradicionales para representaciones tiempo-frecuencia-energía.

La transformada de Hilbert-Huang puede dividirse en dos etapas: descomposición modal empírica y análisis espectral de Hilbert.

2.3.1 Descomposición modal empírica

La descomposición modal empírica se basa en la suposición de que cualquier conjunto de datos puede dividirse en un conjunto de modos de oscilación intrínsecos. Cada modo de vibración, lineal o no, representa una oscilación simple que tiene el mismo número de extremos relativos y puntos de corte con el eje OX. Además la oscilación será simétrica respecto de su media local. Es decir, en un instante de tiempo los datos tienen una gran cantidad de modos de oscilación, cuya suma es el estado de vibración total. Cada uno de los modos de vibración se llama función modal intrínseca (IMF, del inglés *intrinsic modal function*) y puede definirse de la siguiente manera [5]:

- En el conjunto total de datos el número de extremos y ceros debe ser igual. Entendiendo por extremos los máximos y mínimos relativos de la función que representa la señal y por ceros los puntos de corte con el eje de abscisas.
- En cualquier punto, el valor medio de la envolvente definida por los máximos relativos y la envolvente definida por los mínimos relativos es cero.

El algoritmo de la descomposición modal empírica es el siguiente:

Se identifican todos los máximos y los mínimos y se traza una spline cúbica que pase por todos los máximos y otra que pase por todos los mínimos, la media de ambas splines será m_1 .

Se resta dicha media al conjunto total de datos $x(t)$ obteniendo $h_1(t)$

$$h(t) = x(t) - m_1(t) \quad (2.7)$$

Volvemos a repetir este proceso con $h_1(t)$, y obtendremos la media $m_2(t)$ y un nuevo subconjunto $h_2(t)$. Este proceso, denominado “*shifting process*” debe ser repetido tantas veces como sea necesario hasta conseguir una IMF. En la figura 2.3 se muestra un ejemplo de este proceso en su primera iteración.

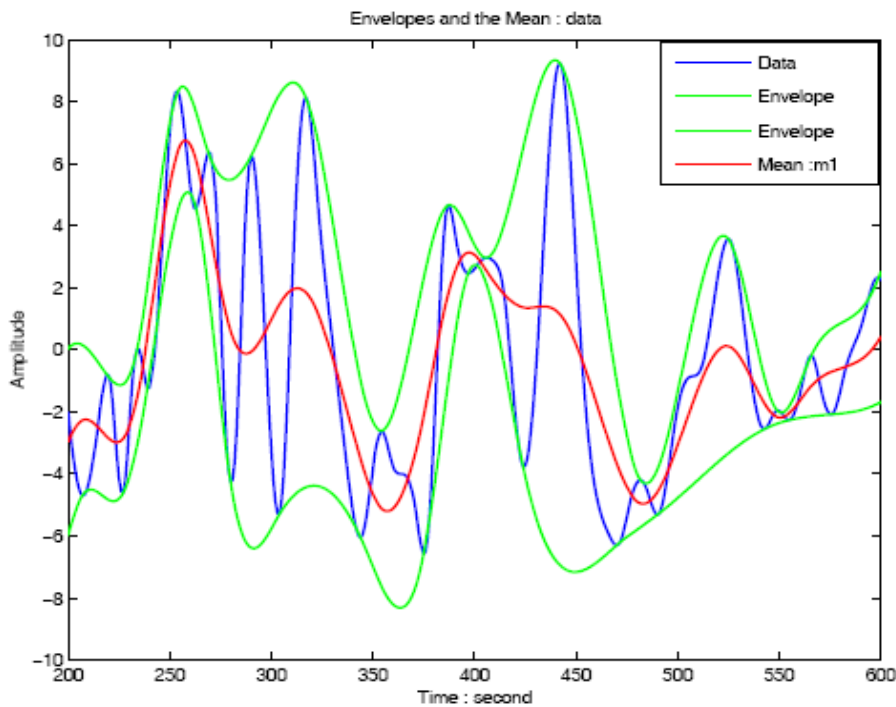


Figura 2.3. Ejemplo del proceso “*Shifting*” en su primera iteración [2]

Surge la necesidad de establecer un criterio de parada, hay dos posibilidades, la primera de ellas es que la diferencia cuadrática (ecuación 2.8) entre dos muestras consecutivas sea menor que un valor prefijado.

$$SD_k = \frac{\sum_{t=0}^T |h_{k-1}(t) - h_k(t)|^2}{\sum_{t=0}^T h_{k-1}(t)^2} \quad (2.8)$$

El problema es que este criterio de parada no asegura que nuestra IMF tenga el mismo número de extremos y ceros. Huang propone un segundo método, el proceso parará cuando el número de ceros y extremos difiera en no más de 1 consecutivamente durante un número prefijado de veces. Tras algunos estudios se determinó que dicho número debe estar comprendido entre 4 y 8 veces [5], en este proyecto se ha decidido que el número de veces que debe repetirse consecutivamente la condición para que el proceso pare sea 6.

Una vez se cumple el criterio de parada separamos nuestra IMF, se la restamos a los datos iniciales obteniendo un residuo al que volveremos a aplicar el *shifting process*. Seguiremos aplicando la descomposición hasta que se cumpla uno de los dos siguientes criterios. Que el valor de los residuos sea muy pequeño o que estos sean una función sin extremos relativos de la que no se podrán extraer más IMF [5].

El resultado final será un conjunto de IMF como las mostradas en la figura 2.4. Evidentemente la señal inicial puede recomponerse con tan sólo sumar los IMF obtenidos y los residuos finales, dichos residuos suelen despreciarse a la hora de efectuar el análisis posterior.

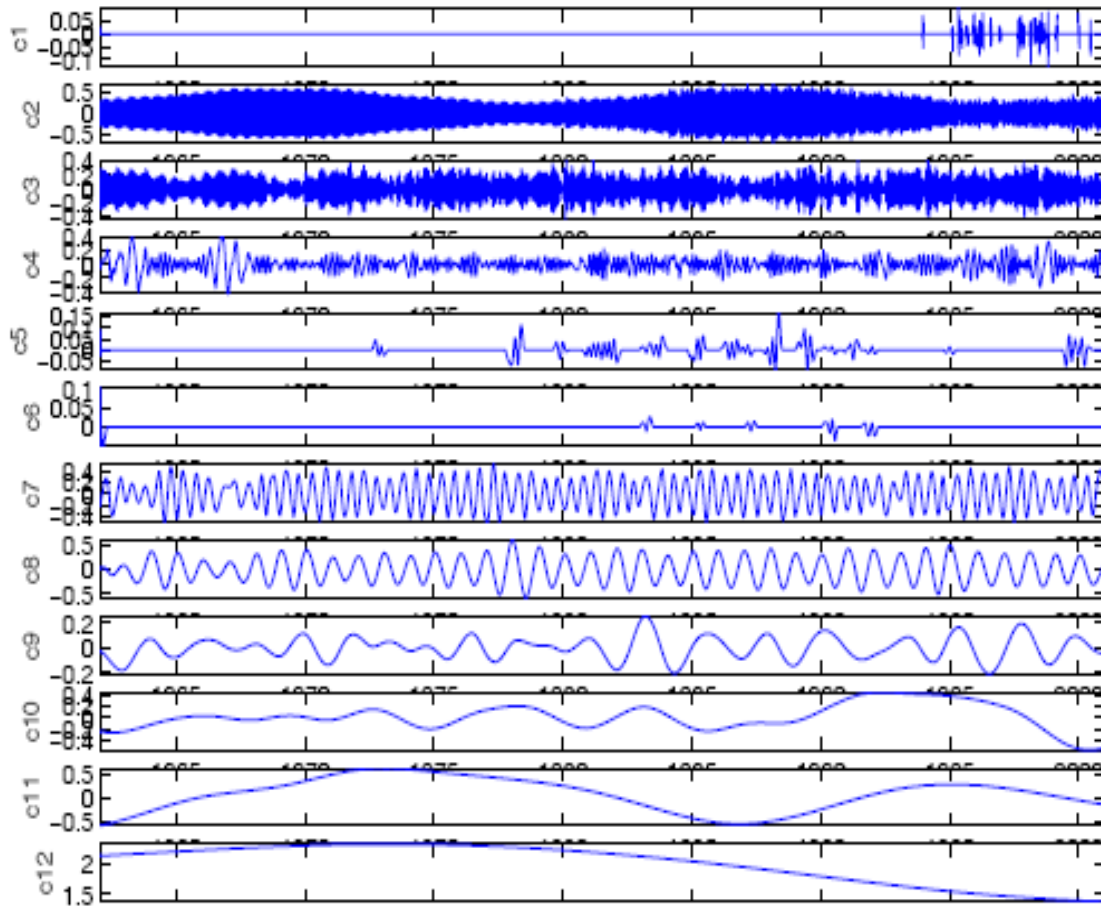


Figura 2.4. Descomposición Modal Empírica de una señal [2]

2.3.2. Análisis espectral de Hilbert

Una vez hecha la descomposición modal empírica puede aplicarse la transformada de Hilbert a cada uno de los IMF obtenidos. El motivo para realizar la descomposición es poder encontrar las frecuencias instantáneas de la señal, antes de que Huang introdujera la EMD la utilización de la transformada de Hilbert se limitaba a señales con el mismo número de extremos y ceros [5].

La transformada de Hilbert, $H[x(t)]$, de una señal $x(t)$ se define como:

$$y(t) = H[x(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(u)}{t - u} du \quad (2.9)$$



- CAPÍTULO 2. CONTEXTO TEÓRICO -

Y la señal analítica, $z(t)$, se define como:

$$z(t) = x(t) + jy(t) = a(t)e^{j\theta(t)} \quad (2.10)$$

Donde

$$a(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)} \quad (2.11)$$

$$\theta(t) = \arctg \left(\frac{y(t)}{x(t)} \right) \quad (2.12)$$

Por último podemos hallar la frecuencia instantánea por medio de la ecuación 2.13.

$$\omega(t) = \frac{d\theta}{dt} \quad (2.13)$$

Con estos datos puede realizarse una gran cantidad de análisis, todos los ensayos indican que la transformada de Hilbert-Huang es una herramienta muy potente para el análisis tiempo frecuencia de señales no lineales y no estacionarias. Está basada en una base adaptativa y la frecuencia se define a través de la transformada de Hilbert [5].

3. SISTEMA EXPERIMENTAL

3.1. Descripción del equipo experimental

El sistema experimental usado en la realización del proyecto se describe a continuación. Se trata del banco de ensayos de rodamientos donde se instalaron los elementos mecánicos necesarios para realizar el ensayo. Se trata de la máquina de simulación de fallos (MFS, del inglés “*Machine Fault Simulator*”) de la casa SpectraQuest. También se describen los elementos que se necesitaron para la adquisición de la señal, filtrarla, acondicionarla y el ordenador donde se observaron y almacenaron los resultados del experimento [6].

3.1.1. Banco de ensayos

La MFS se trata de una máquina capaz de simular las condiciones de funcionamiento de un eje con sus rodamientos acoplados. Esta máquina está compuesta por un motor eléctrico, regulador de la velocidad de giro de éste, un eje (unido al motor mediante un acople), dos rodamientos, una masa de inercia que se usó para cargar los rodamientos, y una bancada. En la figura 3.5 se presenta el banco de ensayo.

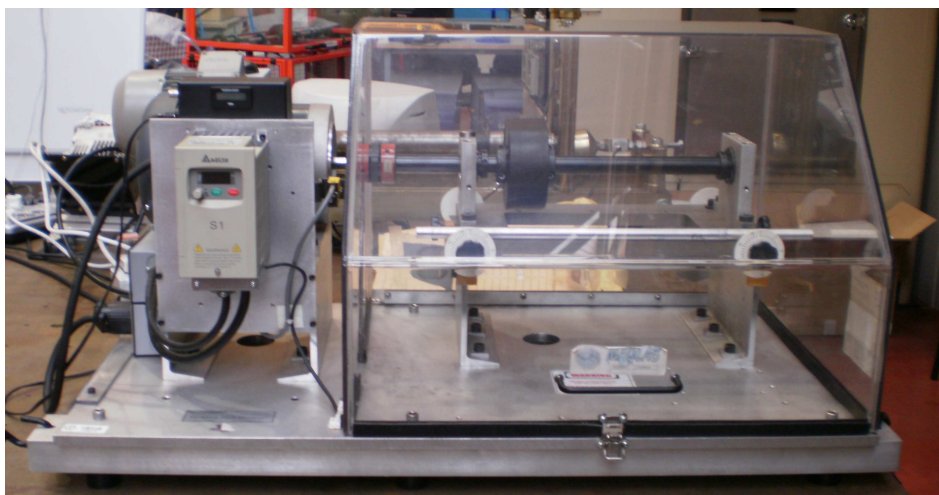


Figura 3.5. La MFS de SpectraQuest utilizada para realizar las medidas

3.1.2. Rodamientos

Para la adquisición de las medidas se utilizaron rodamientos del tipo ER16K de la empresa MB Manufacturing facilitados por el fabricante. En la figura 3.6 se muestra el rodamiento utilizado.

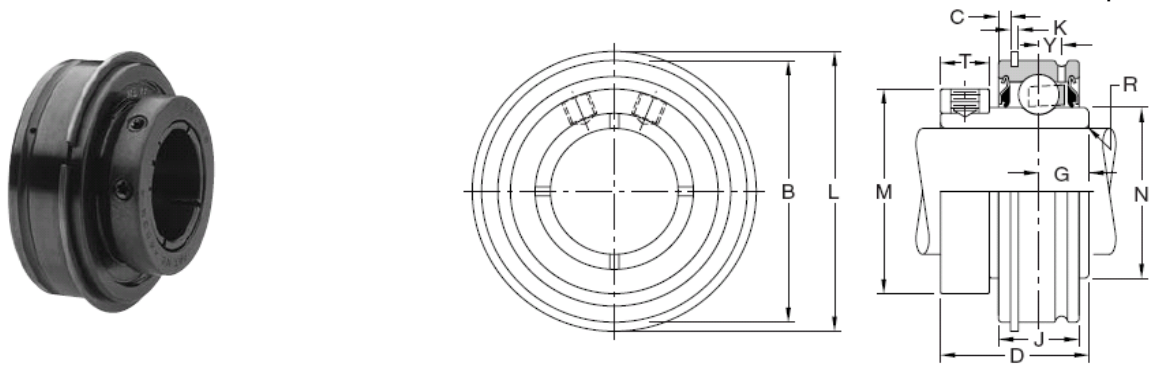


Figura 3.6. Rodamiento ER16K [7]

Del catálogo del fabricante se obtuvieron los parámetros necesarios para realizar los estudios técnicos. Nótese en la figura 3.6 que el diámetro externo es la dimensión B, el diámetro interno es el diámetro del eje (1 pulgada) y la anchura total es la dimensión D en la figura anterior [7].

Angulo de Contacto (α)	0°
Diámetro Externo (D)	52 mm
Diámetro Medio (D_m)	38,7 mm
Diámetro Interno (d)	25,4 mm
Ancho total	34,92 mm
Diámetro de las Bolas (B_d)	7,94 mm
Número de Bolas (n)	9
Carga máxima (C)	10810 N

Tabla 3.1 Parámetros del rodamiento ER16K

Como este estudio trata sobre rodamientos con defecto se utilizaron cuatro condiciones de rodamientos: con defecto en bola, con defecto en pista interna, con defecto en pista externa y sin defecto (también llamados normales en el transcurso del proyecto). A continuación se muestran en las figuras 3.7, 3.8 y 3.9 algunas fotos de defectos en rodamientos a modo de ejemplo:



Figura 3.7. Ejemplo de rodamientos con defectos en pista interna [1]



Figura 3.8. Ejemplo de rodamientos con defecto en pista externa [1]



Figura 3.9. Ejemplo de rodamientos con defecto en bola [1]

3.1.3. Configuraciones de carga

En este proyecto las velocidades de giro de la máquina serán de 10 Hz, 20 Hz y 30 Hz que se corresponde con 600 rpm, 1200 rpm y 1800 rpm respectivamente. La masa de inercia que se usó para cargar los rodamientos fue de 5 kg. Esta masa se colocó en tres

posiciones con el objetivo de cargar el rodamiento con diferentes valores. El rodamiento de la izquierda es en el que se tomaron las medidas, y las posiciones de la masa fueron:

- **Alta Carga:** la masa se situó a la izquierda, cerca del rodamiento en el cual estará situado el acelerómetro. En la figura 3.5 se puede observar esta configuración.
- **Media Carga:** la masa se colocó en la mitad del eje, entre los dos rodamientos. En la figura 3.10 se muestra esta configuración.



Figura 3.10. Configuración de la MFS en media carga

- **Baja carga:** la masa se sitúa cerca del rodamiento de la derecha, por lo que el rodamiento en el que se miden las vibraciones sufrirá poca carga. En la figura 3.11 se puede observar esta configuración.



Figura 3.11. Configuración de la MFS en baja carga

Para saber la carga que sufre el rodamiento en cada configuración se midieron las distancias entre rodamientos y la distancia de éstos a la masa de inercia con un pie de rey. En la figura 3.12 se representa un esquema del cálculo de las cargas del rodamiento.

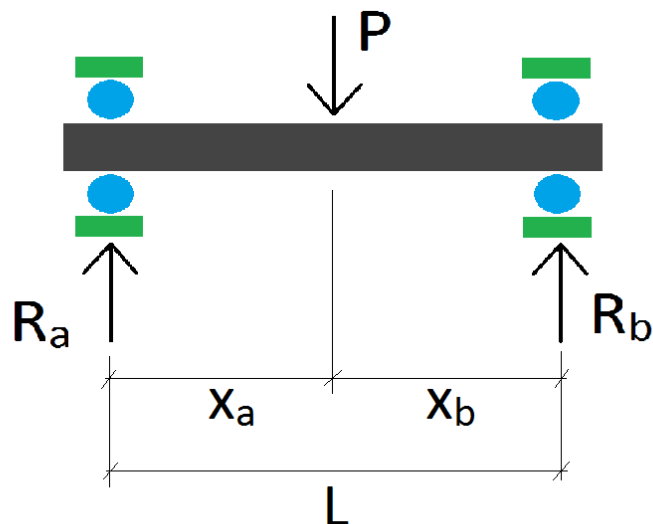


Figura 3.12. Cálculo de cargas en los rodamientos



- CAPÍTULO 3. SISTEMA EXPERIMENTAL -

La ecuación necesaria para calcular la reacción en el rodamiento izquierdo es la (3.1):

$$R_a = \frac{P \cdot x_b}{L} \quad (3.1)$$

Donde:

R_a = reacción en el rodamiento izquierdo, donde se realizarán las medidas del ensayo

R_b = reacción en el rodamiento derecho

P = masa de inercia

X_b = distancia del rodamiento derecho a la masa

L = distancia entre los rodamientos

Sustituyendo las mediciones obtenidas con el pie de rey en cada configuración de carga y teniendo en cuenta el valor de la carga máxima del rodamiento (véase tabla 3.1) se consiguen los valores de la reacción en el rodamiento estudiado y el porcentaje de carga del rodamiento frente a la carga máxima. La tabla 3.2 muestra los valores obtenidos:

Configuración de Carga	P (N)	C (N)	X_b (mm)	L (mm)	R_a (mm)	$\frac{R_a}{C} (\%)$
Alta	4,9	10.810	284,85	362,1	38,55	0,357
Media	4,9	10.810	181,05	362,1	24,5	0,227
Baja	4,9	10.810	77,25	362,1	10,45	0,097

Tabla 3.2. Reacción en el rodamiento en las tres configuraciones de carga

A pesar de que como se observa en la tabla 3.2 el valor del porcentaje de cargado en la configuración de alta carga solamente corresponde a un 0,357%, se optó por no cargar más el rodamiento por motivos de seguridad.

3.1.4. Medición, amplificación y filtrado de la señal

Para la toma de la señal se usó un acelerómetro triaxial K5943B de Brüel&Kjaer, aunque sólo se guardaron y analizaron las señales de los ejes X e Y, que se colocó en la carcasa del rodamiento de forma que la dirección X coincidió con la vibración transversal del eje, la dirección Y con la vibración vertical del eje y la dirección Z con la vibración longitudinal del eje. Este acelerómetro estaba situado en el rodamiento de la izquierda. En la figura 3.13 es una foto del acelerómetro situado en el rodamiento.

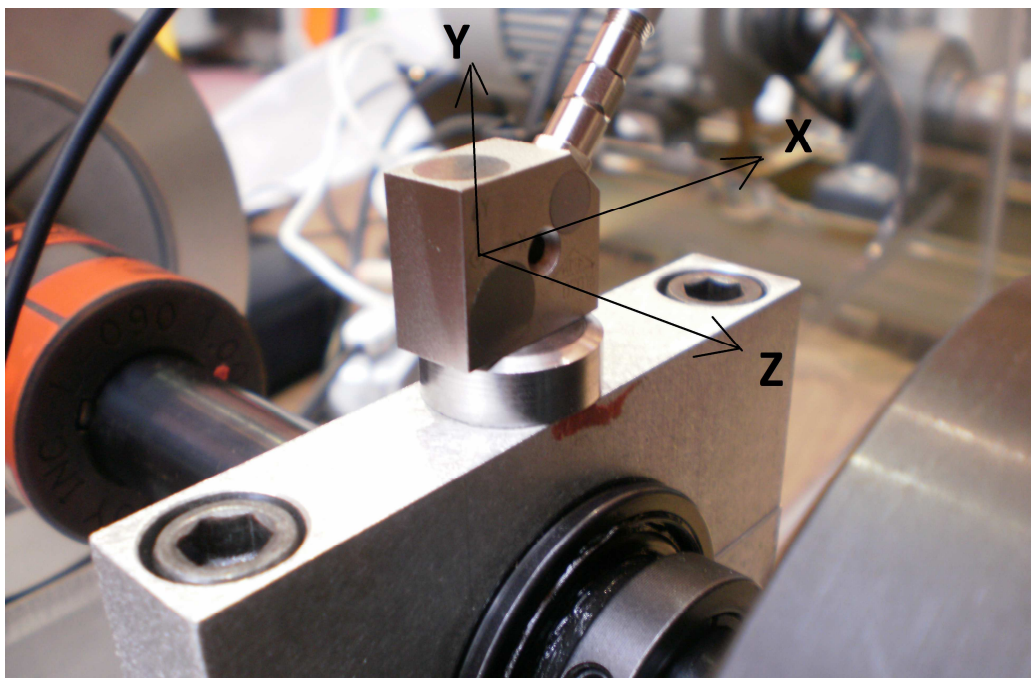


Figura 3.13. Acelerómetro triaxial K5943B de Brüel&Kjaer en la carcasa del rodamiento

De este acelerómetro se conectó un cable hasta el amplificador que (también actuó de filtro) que se muestra en la figura 3.14, del modelo M32 de la marca MMF.



Figura 3.14. Amplificadores usados en la realización del ensayo

Se conectaron cuatro amplificadores de este tipo en serie, de modo que se conectaron a 3 de ellos sendos cables que salen del acelerómetro, mientras que en el cuarto amplificador se conectó el cable que se unió al tacómetro para poder tener un registro propio de la velocidad de giro del eje mientras se realizaba el ensayo, aunque la propia máquina cuenta con un regulador de velocidad [6].

3.1.5. Adquisición y almacenamiento de los datos

Para la adquisición de los datos se utilizó una tarjeta Keithley KUSB-3100 que tiene canales tanto analógicos como digitales. Para el presente proyecto sólo se usaron las entradas analógicas, que tienen una frecuencia de muestreo máxima de 1 MHz por canal, suficiente para este proyecto (se tomará una frecuencia de muestreo de 5 kHz). La figura 3.15 es una foto de la tarjeta de adquisición de datos.



Figura 3.15. Tarjeta de adquisición de datos Keithley KUSB-3100

Al recibir esta tarjeta de adquisición de datos las señales de 4 amplificadores se necesitaron utilizar 4 canales de la tarjeta, lo cual no fue un problema ya que la tarjeta cuenta con 8 canales analógicos.

Para el procesamiento y almacenamiento de las señales medidas se usó un ordenador portátil. El ordenador se conectó a la tarjeta de adquisición de datos mediante un puerto USB.

El programa de adquisición está desarrollado con el Software Test Point, que representa gráficamente las señales tomadas en los ensayos y también es capaz de realizar el procesamiento Software de las señales adquiridas de manera sencilla, mostrando en pantalla la transformada de Fourier de la señal para un solo eje. De este modo se pudo realizar un pequeño análisis preliminar para observar si había sucedido alguna contingencia durante la toma de la señal y saber si era necesario volver a realizar la medición de la señal. Una vez adquiridos los datos y observar que la señal no parecía haber sido modificada por alguna circunstancia externa al experimento se guardaban los datos en el ordenador para que pudieran ser tratados más adelante durante el desarrollo del proyecto. La figura 3.16 muestra el programa Test Point utilizado en el ensayo.



- CAPÍTULO 3. SISTEMA EXPERIMENTAL -

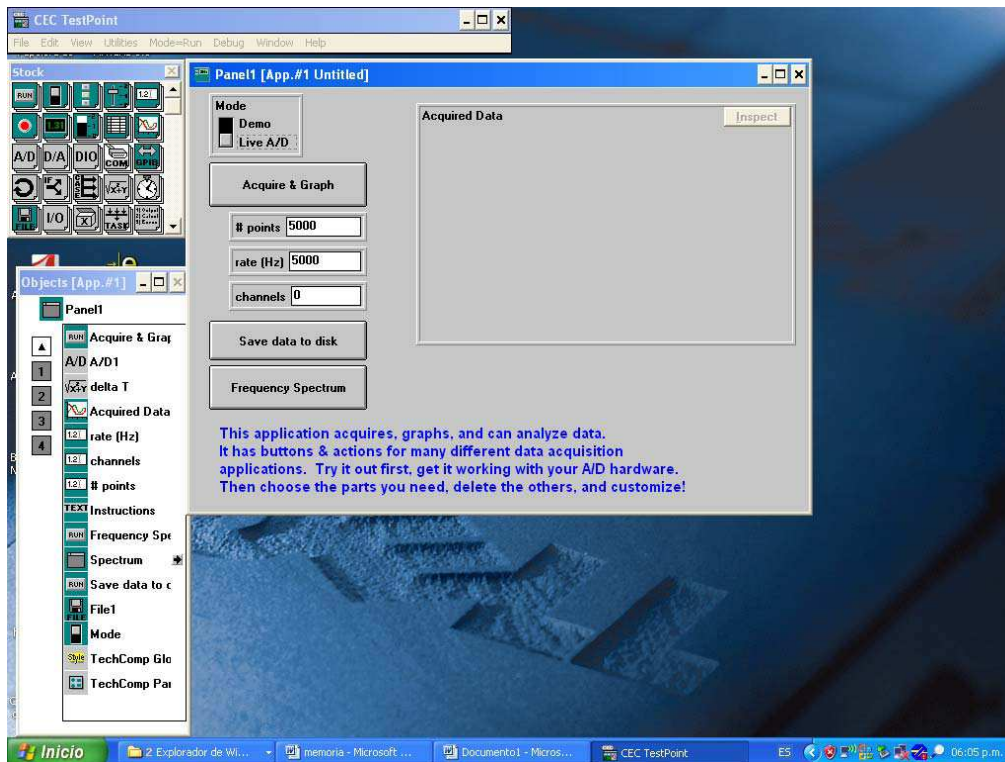


Figura 3.16. Programa de adquisición de datos Test Point

En resumen la cadena de medida se compone de: el rodamiento, el acelerómetro, los amplificadores/filtros, la tarjeta de adquisición de datos y el ordenador portátil. A modo de aclaración se ilustra la cadena de medida en la figura 3.17.

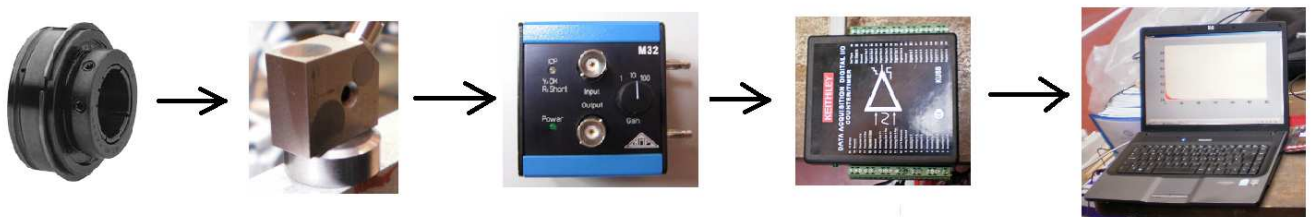


Figura 3.17. Cadena de medida para el banco de ensayos de rodamientos

3.1.6. Montaje de las configuraciones ensayadas

En este proyecto como se ha comentado se ensayaron 4 condiciones de rodamientos (normales, con defecto en bola, con defecto en pista interna y con defecto en pista externa) para las 3 configuraciones de la carga (alta carga, media carga y baja carga), con lo que hubo que preparar la máquina para cada uno de los 15 ensayos. El montaje de la parte de medición, amplificación, filtrado, adquisición y almacenamiento de las señales tomadas era el mismo para los 15 ensayos por lo que no fue necesario realizar modificaciones en estos componentes. En cambio en la máquina hubo que cambiar los rodamientos en cada una de las configuraciones: desmontar la parte de la máquina donde estaban sujetos los rodamientos, quitar el rodamiento del eje, cambiarlo y volver a montar el soporte donde se colocaba el nuevo rodamiento. Para cambiar la masa simplemente es necesario desplazar la masa a la distancia apropiada para el ensayo aflojando y volviendo a apretar los tornillos en la posición definitiva. Para este montaje se utilizaron llaves hexagonales con la característica especial de que al ser la máquina americana las llaves debían ser de medidas americanas, es decir, en pulgadas. Algunas llaves hexagonales se muestran en la figura 3.18. La figura 3.19 es una foto tomada durante el cambio del rodamiento y la figura 3.20 muestra el montaje completo de la máquina y la cadena de medida.



Figura 3.18. Llaves hexagonales que se usaron en el montaje

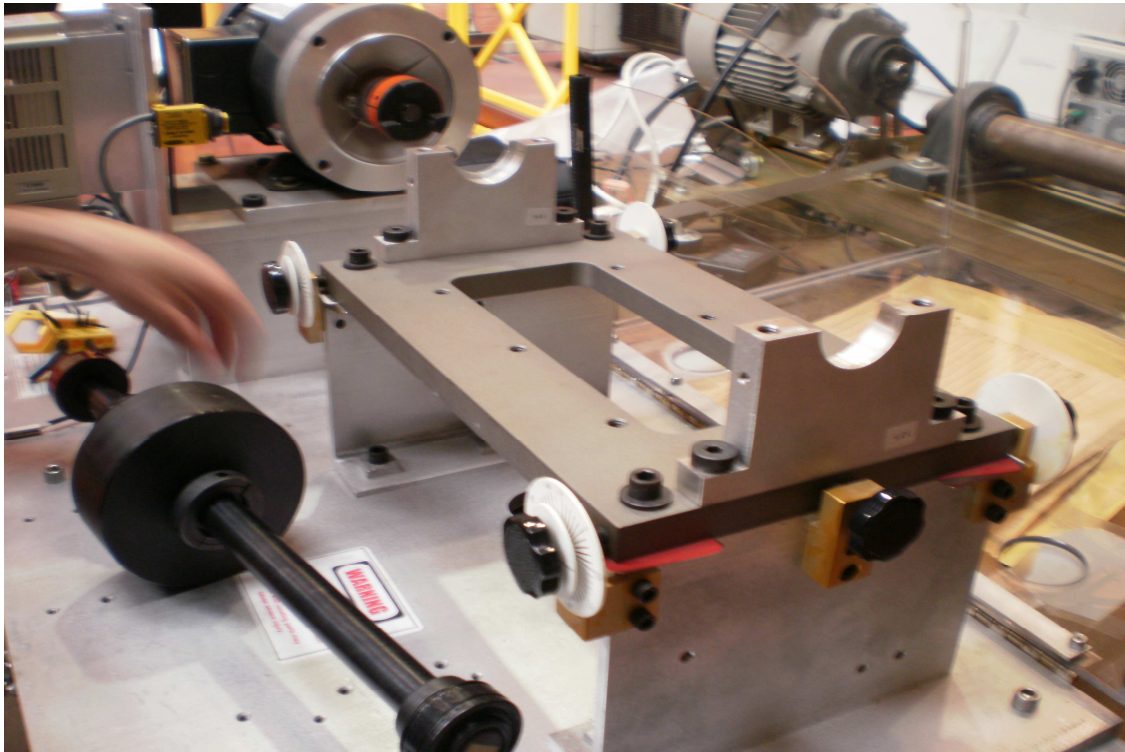


Figura 3.19. Montaje del eje y de los rodamientos

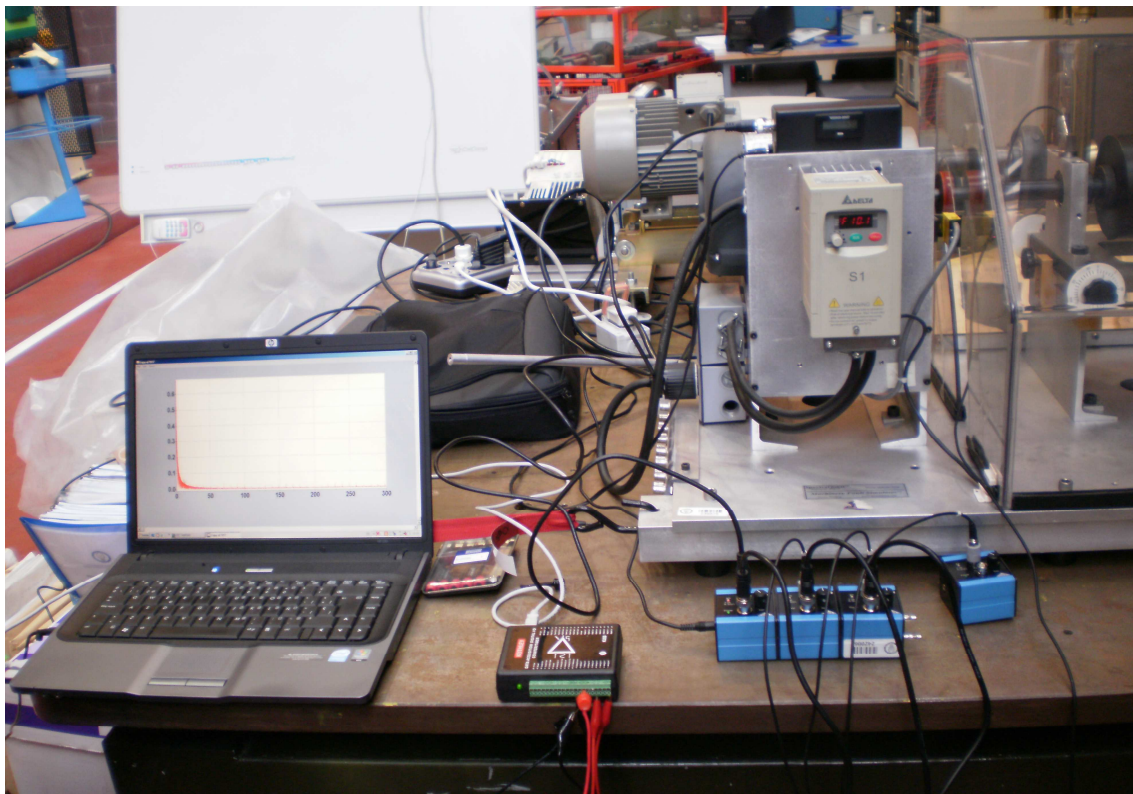


Figura 3.20. Montaje completo de la parte de medición, amplificación, filtrado, adquisición y almacenamiento de las señales tomadas

3.2. Frecuencia de muestreo y número de muestras necesarias

Los ensayos se han realizado para tres velocidades de giro del eje que han sido 600 rpm (10 Hz), 1200 rpm (20 Hz) y 1800 rpm (30 Hz). El motivo por el cual se tienen en cuenta señales a distintas velocidades es para observar cómo afecta la velocidad en las señales producidas por los rodamientos defectuosos. Se ha elegido una frecuencia de muestreo de 5000 Hz, es decir, se tomaron 5000 muestras cada segundo.

Para el tamaño de la señal experimental, es decir el número de muestras representativas, se debe recoger una muestra suficientemente grande como para tener una cantidad de datos cercana al correspondiente al giro completo de un rodamiento. Dada la velocidad de giro del rodamiento (ω) y la frecuencia de muestreo (Δf), la cantidad de muestras necesarias para registrar un giro del rodamiento vendrá dada por la siguiente ecuación [1]:

$$N^{\circ}\text{muestras necesarias} = \frac{\Delta f}{\omega} \quad (3.2)$$

Similarmente, el tiempo que tarda el rodamiento en completar una vuelta (T), se puede calcular con la ecuación:

$$T = \frac{1}{\omega} \quad (3.3)$$

Dadas las velocidades escogidas en este proyecto y la frecuencia de muestreo del mismo se puede calcular la siguiente tabla:

ω (rpm)	ω (Hz)	T (s)	N°mn
600	10	0,1	500
1200	20	0,05	250
1800	30	0,033	167

Tabla 3.3. Número de muestras necesarias para cada velocidad



Como se observa en la tabla 3.3 el mayor número de muestras necesarias se da a 600 rpm, 500 muestras necesarias, con lo que la frecuencia de muestreo de nuestro proyecto, de 5000 Hz, es muy superior a la requerida en el caso más crítico.

3.3. Frecuencia de defecto de los rodamientos

Las frecuencias de fallo de los rodamientos varían en función del tipo de rodamiento y de la velocidad de giro. Tomando los parámetros del rodamiento ER16K cuyos datos están en la tabla 3.1 y aplicando las ecuaciones (2.1), (2.2), (2.3) y (2.4) se obtienen las frecuencias para cada tipo de fallo y cada velocidad que se presentan en la tabla 3.4:

f (Hz)	FTF (Hz)	BPTI (Hz)	BPTO (Hz)	BSF (Hz)
10	3,97	54,23	37,77	23,34
20	7,94	108,47	71,53	46,69
30	11,92	162,70	107,30	70,03

Tabla 3.4. Frecuencias de defecto de los rodamientos

3.4. Nomenclatura de las señales adquiridas

La nomenclatura usada para nombrar las señales de este proyecto se explica a continuación. El nombre de las señales consta de tres partes:

- La primera letra que indica la carga a la estaba sometido el rodamiento:
 - a → ensayo realizado en configuración de alta carga.
 - m → ensayo realizado en configuración de media carga.
 - b → ensayo realizado en configuración de baja carga.
- Los siguientes dos números que indican la velocidad de giro:
 - 10 → velocidad de giro de 10 Hz (600 rpm).
 - 20 → velocidad de giro de 20 Hz (1200 rpm).
 - 30 → velocidad de giro de 30 Hz (1800 rpm).



- CAPÍTULO 3. SISTEMA EXPERIMENTAL -

- La última letra que representa el defecto del rodamiento:
 - n → rodamiento normal o sin defecto.
 - b → rodamiento con defecto en bola.
 - i → rodamiento con defecto en pista externa.
 - e → rodamiento con defecto en pista externa.

Por ejemplo la señal “*m20i*” es la señal del rodamiento con defecto en pista interna girando a una velocidad de 20 Hz y en una configuración de media carga.

4. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

En este capítulo se realizará un estudio de las señales obtenidas en los ensayos descritos en el capítulo 3. Las señales almacenadas durante los ensayos fueron las siguientes:

- Se ensayaron **4 condiciones de rodamientos** (sin defecto o normal, con defecto en el elemento rodante, con defecto en pista interna y con defecto en pista externa).
- Cada condición de rodamiento se ensayó a **3 velocidades de giro del eje** distintas (10 Hz, 20 Hz y 30 Hz).
- Y para cada una de las condiciones anteriores se ensayó para **3 configuraciones de carga** diferentes (alta carga, media carga y baja carga).
- Estas señales procedentes del acelerómetro que mide las vibraciones de los rodamientos se almacenaron tanto para las vibraciones en el **eje X** (transversal) como en el **eje Y** (vertical).

Teniendo en cuenta todas las señales tomadas se ha trabajado con un total de $4 \times 3 \times 3 \times 2 = 72$ señales para su análisis.

Cada ensayo tuvo una duración de 10 segundos, tomando las vibraciones en régimen permanente, lo cual hace que a una frecuencia de muestreo de 5000 Hz cada señal estuviese compuesta por 50.000 datos. El motivo de realizar una medición de 10 segundos en vez de 1 segundo, que sería tiempo suficiente para observar las vibraciones de los defectos de los rodamientos [2], es que a la hora de proceder con el análisis estadístico del final de este capítulo se trocearán las señales en 5 partes para contar con una mayor cantidad de muestras.

4.1. Selección del eje de estudio de las señales

El acelerómetro permite obtener señales en los 3 ejes. En las observaciones preliminares durante los ensayos se constató que el eje Z (longitudinal) no aportaba información sobre las vibraciones de los rodamientos, así que solamente se almacenaron la información de los ejes X e Y. Calculando los datos a analizar: $72 \times 50.000 = 3,6$ millones de datos. Por lo tanto nos encontramos con una cantidad ingente de datos que analizar. Por este motivo en primer lugar se seleccionará el eje en el que se va a llevar a cabo el análisis de las señales. Con esta selección las gráficas a analizar posteriormente se reducirán de 72 a 36 gráficas.

Para llevar a cabo esta selección se compararán las vibraciones en cada eje (el transversal X o el vertical Y) para determinar en cuál de ellos se observa la mayor vibración, es decir la mayor energía o amplitud, debida a los rodamientos. Para realizar esta comparación en primer lugar se aplicará la transformada de Hilbert-Huang a todas las señales en las dos direcciones. Al procesar cada señal con esta transformada el resultado es que se obtiene la señal dividida en 15 función modales intrínsecas, IMF, cada una de ellas con su espectro de frecuencias de las vibraciones del rodamiento. De estas IMF sólo nos van a reportar información interesante las primeras, la IMF 1 o la IMF 2.

Una vez seleccionada una IMF ya se puede realizar la comparación entre las direcciones. Dicha comparación se realizó para cada señal, pero en las siguientes figuras (4.21, 4.22, 4.23 y 4.24) sólo se muestran las más representativas de cada condición de rodamiento.

4.1.1. Rodamiento normal

En estos casos al tratarse de rodamientos sin defecto resulta difícil encontrar alguna frecuencia representativa de los rodamientos. No obstante en la señal “a10n” (rodamiento normal a 10 Hz en configuración de alta carga) se encuentra claramente, en ambos ejes, la FTF (frecuencia de rotación de la jaula que contiene los elementos rodantes) que a esta velocidad es de 5,4 Hz.

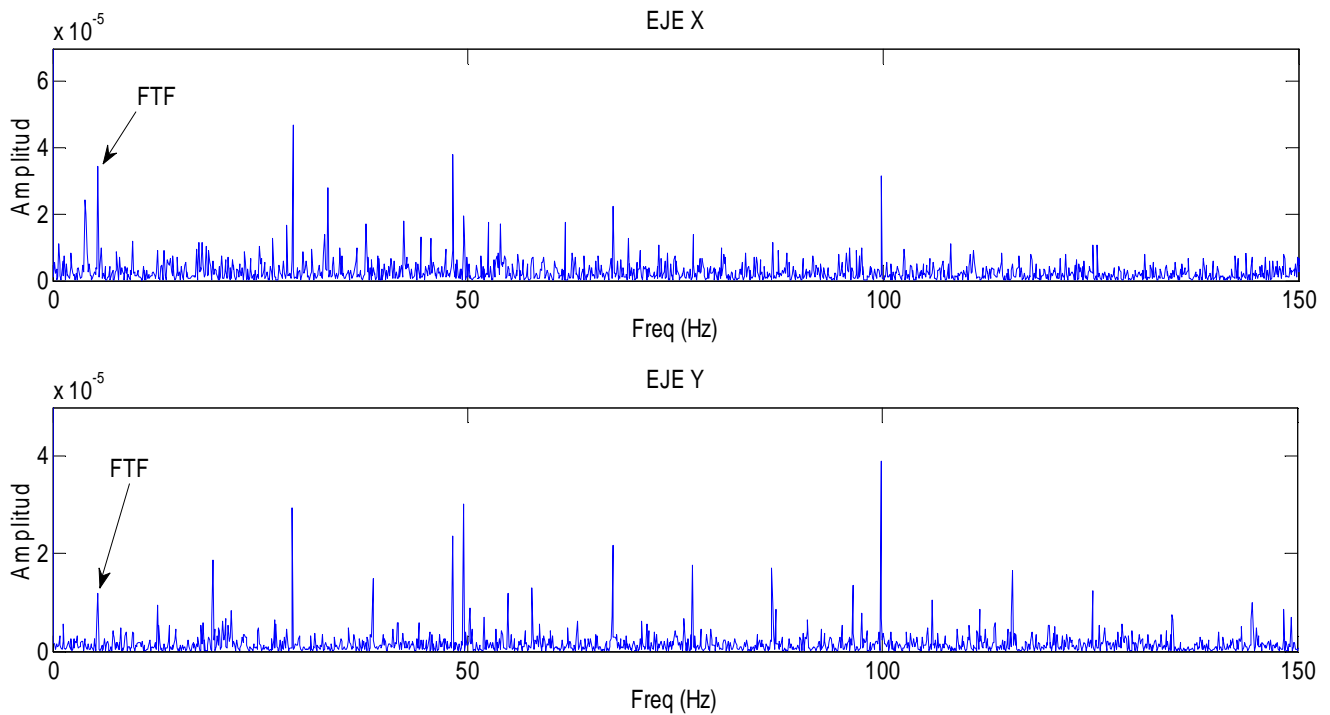


Figura 4.21. Espectro de frecuencias de la señal “a10n” en ejes X-Y

Para esta señal se utilizó la IMF2 ya que es donde mejor se observan los picos de vibración. En los demás sólo se indicará la IMF tomada, siendo en todos los casos la IMF en la que se observaron mejor las vibraciones.

En las gráficas de ambos ejes se ven las frecuencias de FTF, armónicos de la velocidad de giro y las frecuencias de red a 50 Hz y 100 Hz. La amplitud de estas frecuencias es superior en el eje X.

Por ejemplo la FTF del eje X tiene una amplitud de $3,44 \cdot 10^{-5}$ mientras que el eje Y tiene una amplitud de $1,176 \cdot 10^{-5}$.

En el resto de casos de un rodamiento normal se sigue la misma tendencia, mayor amplitud para las vibraciones en el eje X, el transversal.

4.1.2. Rodamiento con defecto en bola

Para este rodamiento se representa la señal “*m30b*” (rodamiento con defecto en bola a 30 Hz en configuración de media carga) para ambos ejes.

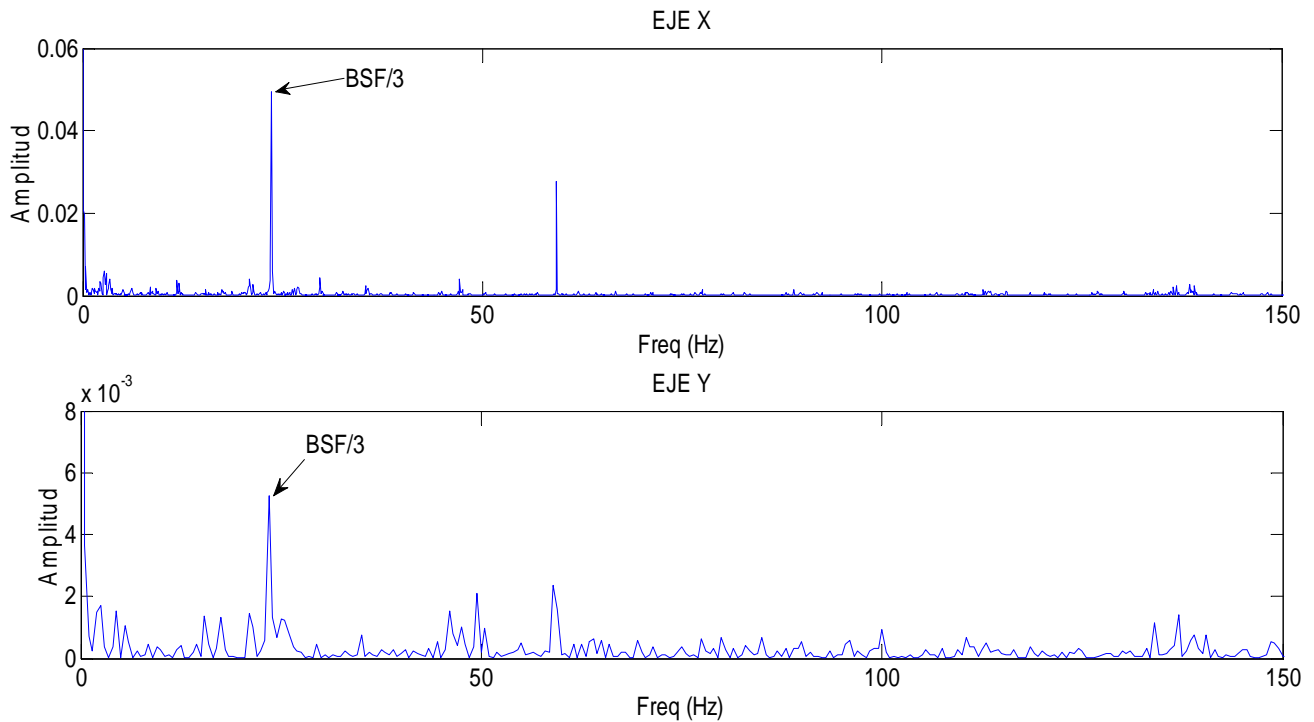


Figura 4.22. Espectro de frecuencias de la señal “*m30b*” en ejes X-Y

Para esta señal se utilizó la IMF1.

La BSF (frecuencia de paso de los elementos rodantes) para esta velocidad es de 70 Hz. Para esta señal coinciden en ambos ejes 23,6 Hz, que puede tratarse de la BSF/3, y el segundo armónico de la velocidad de giro, 60 Hz.

La amplitud de estas frecuencias son aproximadamente un orden de magnitud superior en el eje X.

En el resto de casos de rodamientos con defecto en bola se observa la misma tendencia en las frecuencias coincidentes de ambos ejes para distinta carga y velocidad.

4.1.3. Rodamiento con defecto en pista interna

Para esta condición de rodamiento se representa la señal “a20i” (rodamiento con defecto en pista interna a 20 Hz en configuración de alta carga).

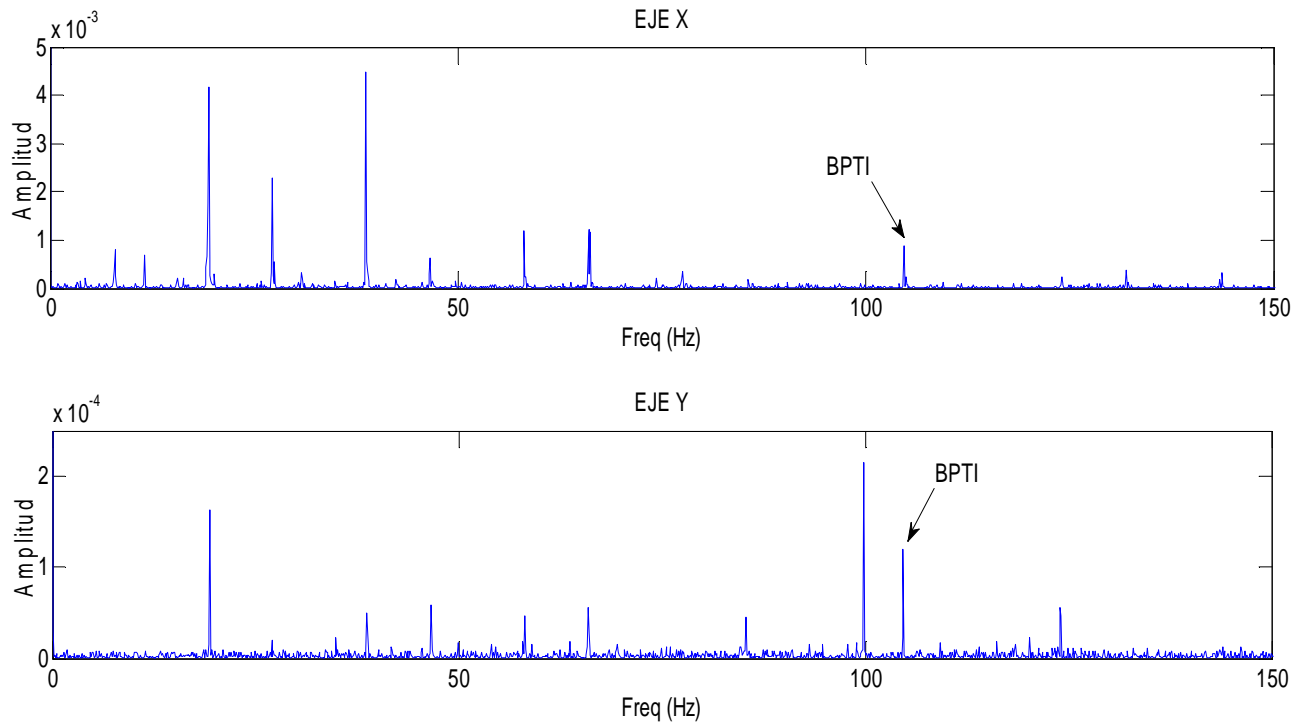


Figura 4.23. Espectro de frecuencias de la señal “a20i” en ejes X-Y

Para esta señal se ha usado la IMF1.

A esta velocidad la BPTI (frecuencia de paso de los elementos rodantes por un defecto de pista interna) es de 108,7 Hz. En esta señal coinciden para ambos ejes tanto la frecuencia de 104,7 Hz, que se trata de la BPTI (que el valor de la frecuencia sea algo inferior puede ser debido a varios factores como que la velocidad no fuese exactamente 20 Hz o el cambio del ángulo de contacto, “ α ”, en los rodamientos), la velocidad de giro y sus armónicos.

Se observa que la señal del eje X tiene una mayor amplitud en las frecuencias mencionadas. Por ejemplo, en el caso de la BPTI se tiene una amplitud de $8,907 \cdot 10^{-4}$ para el eje X y una amplitud de $1,198 \cdot 10^{-4}$ para el eje Y.

En los demás casos estudiados de rodamientos con defecto en pista interna se cumple en líneas generales que hay una mayor amplitud en el eje X que en el eje Y.

4.1.4. Rodamiento con defecto en pista externa

A continuación se muestra la señal “b30e” (rodamiento con defecto en pista externa a 30 Hz en baja carga) para los ejes X e Y.

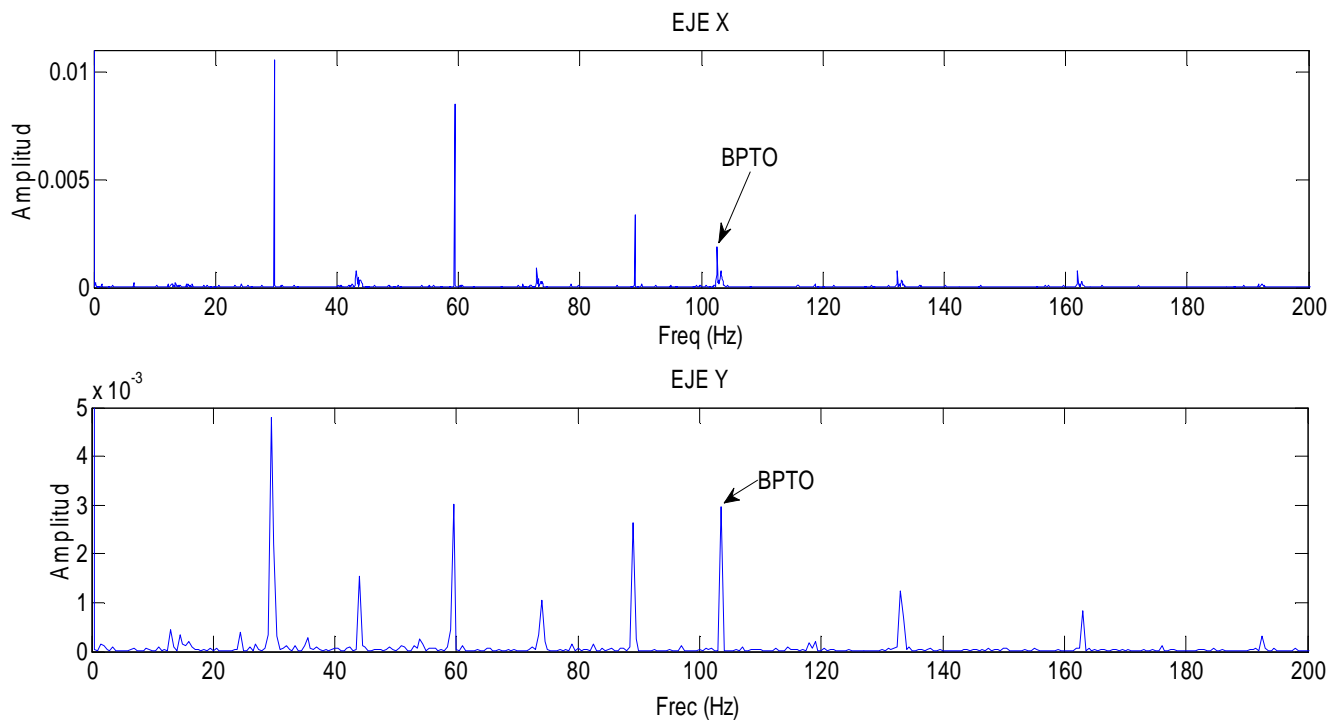


Figura 4.24. Espectro de frecuencias de la señal “b30e” en ejes X-Y

Es esta señal se uso la IMF2.

Para la velocidad de esta señal la BPTO (frecuencia de paso de los elementos rodantes por un defecto en pista externa) es de 107 Hz y la BPTI de 162 Hz. Coinciden las frecuencias de 103 Hz (la BPTO), la de 162 Hz (la BPTI) y la velocidad de giro y sus armónicos.



En este caso las amplitudes tienen valores similares, siendo superiores las amplitudes en el eje X para la velocidad de giro y sus armónicos, mientras que la BPTO y la BPTI tiene una amplitud ligeramente superior para el eje Y.

En el resto de señales de rodamientos con defecto en pista externa se cumple que las amplitudes tienen un valor similar para los dos ejes.

4.1.5. Selección del eje de estudio

Una vez analizados todas las señales en ambas direcciones se obtiene como resultado de comparación entre los ejes que las señales del eje X tienen una amplitud mayor que las del eje Y, a excepción de algunas señales y algunas frecuencias como las señales procedentes del rodamiento con defecto en pista externa.

Esto se puede explicar con la teoría de la elipse de contacto, la cual explica que al aumentar la carga en el lugar de contacto de dos superficies dicha elipse aumenta de tamaño. Debido a este aumento de la elipse puede producirse que el tamaño del defecto sea menor que el de la elipse y las vibraciones en el eje más cargado, que en este caso es el Y (vertical), se atenúen. La conclusión es que el eje X (transversal) soporta menos carga y por lo tanto se pueden observar mejor las vibraciones.

Después de conocer que en el eje X se observan mejor las vibraciones en los análisis siguientes sólo se estudiarán las señales obtenidas en dicho eje. Para dichas señales se procederá en primer lugar a un análisis descriptivo.

4.2. Análisis descriptivo de las señales

En este apartado se realizará un análisis descriptivo de las señales obtenidas en el eje X durante los ensayos con el fin de conocer las frecuencias con mayor amplitud que coinciden para las distintas configuraciones de carga. La información conseguida se usará en el siguiente apartado para hacer el estudio estadístico de dichas señales.

Se representarán y comentarán las señales más significativas para cada condición de rodamiento ensayada para las tres configuraciones de carga (alta, media y baja).

4.2.1. Rodamiento normal

Las señales más representativas, en las que se observan más frecuencias anómalas, para el rodamiento sin defecto se dan a 10 Hz y se muestran en la figura 4.25.

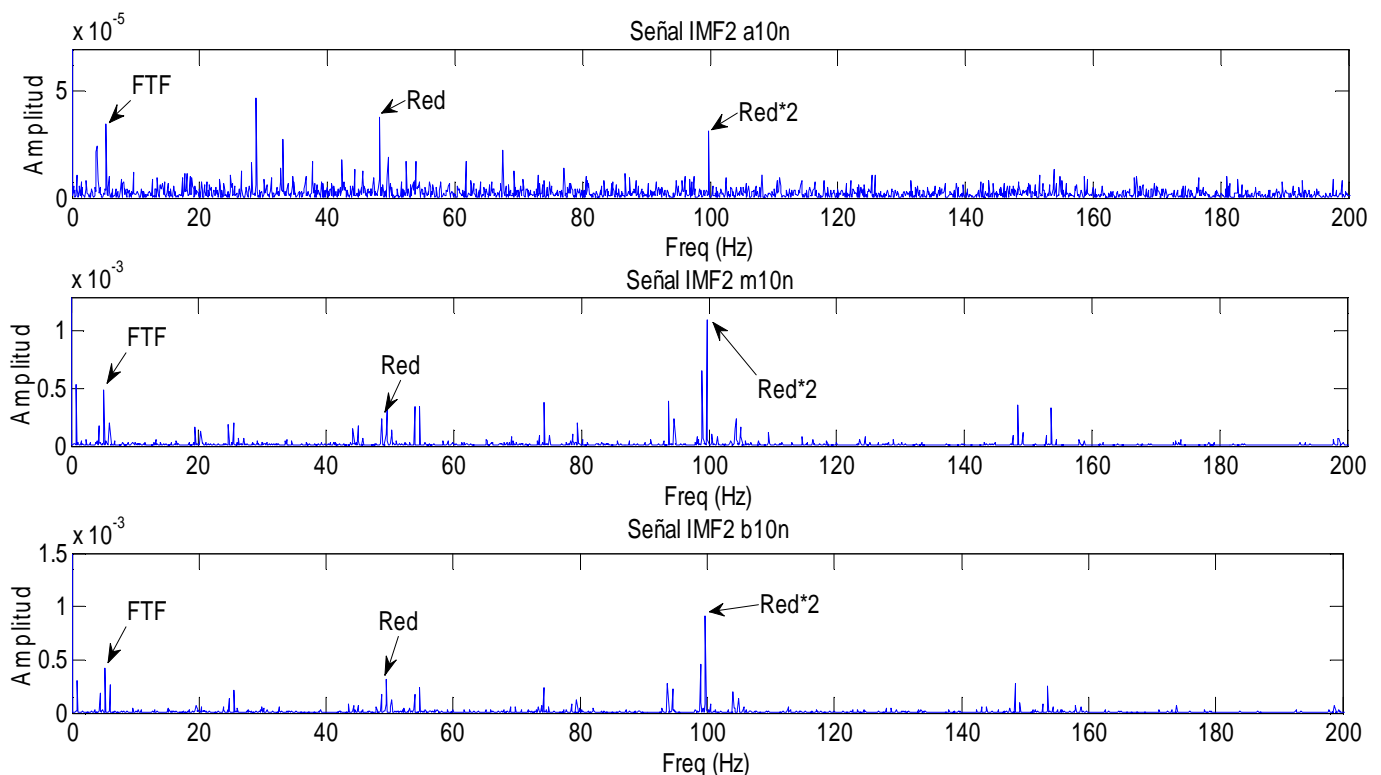


Figura 4.25. Espectro de frecuencias de las señales “a10n”, “m10n” y “b10n”

Al tratarse de un rodamiento sin defectos resulta difícil diferenciar frecuencias que coincidan en las diferentes cargas. No obstante aquí se observan coincidencias en las frecuencias de 5.8 Hz (FTF) y las frecuencias de red 50 Hz y 100 Hz en las tres cargas. Las coincidencias de las frecuencias de red serán una constante a lo largo del estudio.

No se observa ninguna tendencia en la amplitud de las frecuencias en función de la carga.

4.2.2. Rodamiento con defecto en bola

Para el estudio del rodamiento con defecto en bola se presentan las gráficas, en la figura 4.26, correspondientes a 20 Hz de entre las obtenidas.

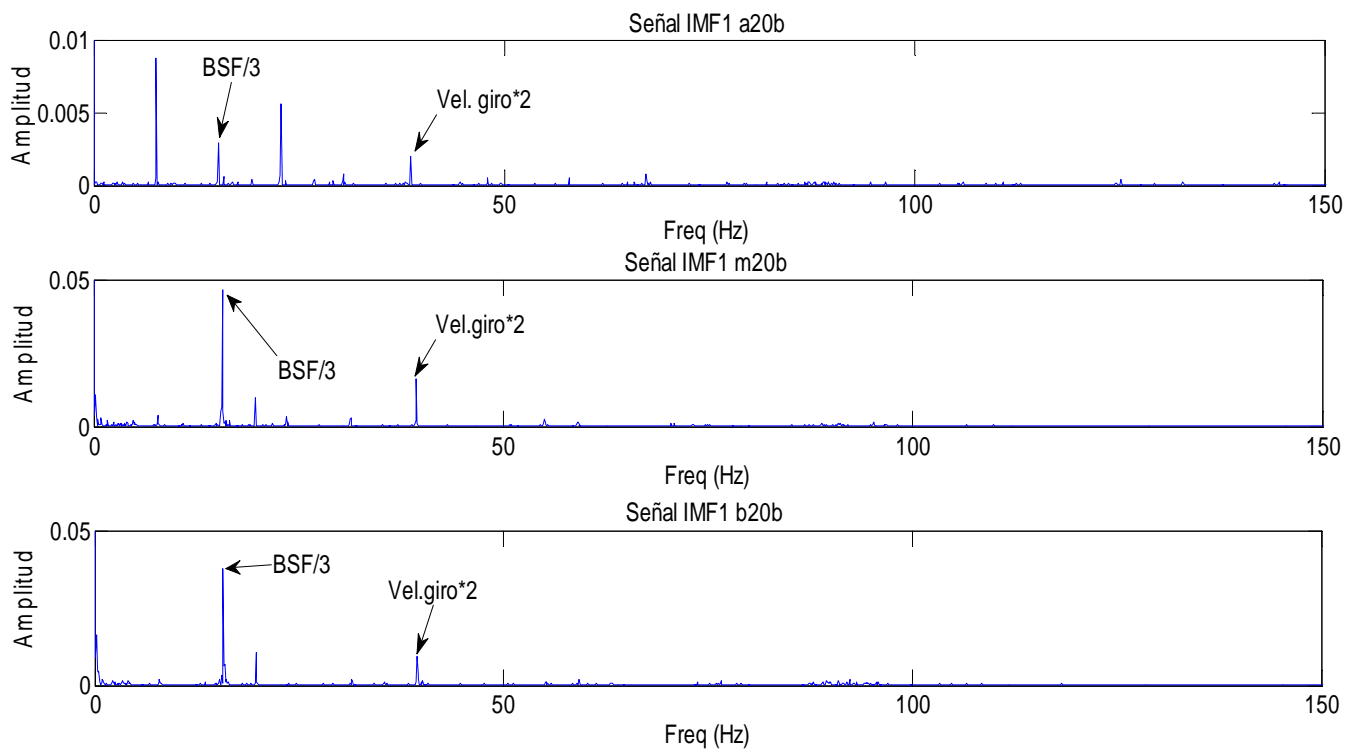


Figura 4.26. Espectro de frecuencias de las señales “a20b”, “m20b” y “b20b”

En estas gráficas se ve claramente como coinciden las frecuencias de 15,7 Hz (BSF/3) y la de 39 Hz que se trata de un armónico de la velocidad. En ambos casos la mayor

amplitud corresponde a media carga seguida de la de baja carga y por última la de alta carga tiene la menor amplitud.

La frecuencia BSF/3 se observó para las tres velocidades estudiadas.

También se puede observar que presentan un pico en los tres espectros las frecuencias de 48 Hz (BSF) y 7,6 Hz (FTF).

4.2.3. Rodamiento con defecto en pista interna

Las gráficas representadas en la figura 4.27 pertenecen a las señales de 10 Hz del rodamiento con defecto en pista interna.

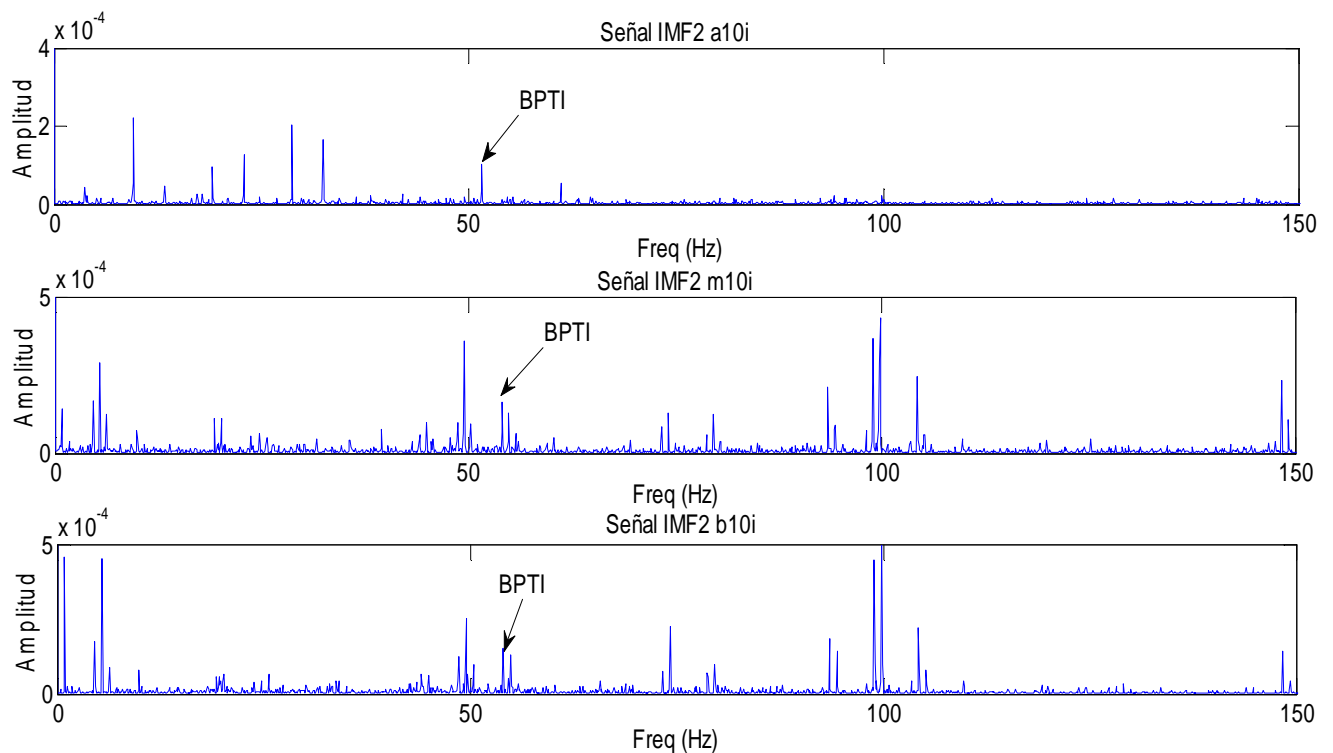


Figura 4.27. Espectro de frecuencias de las señales “a10i”, “m10i” y “b10i”



- CAPÍTULO 4. ANÁLISIS EXPERIMENTAL -

En las tres gráficas se observa la frecuencia de defecto en pista interna (BPTI) de 54,2 Hz. En la de alta carga la amplitud es de un orden de magnitud inferior a las otras dos gráficas, en las cuales la amplitud es casi la misma.

La BPTI se encontró para las tres velocidades ensayadas.

La frecuencia de la velocidad de giro, de red y sus armónicos también se pueden ver con claridad en este caso.

También son observables las frecuencias de 5,4 Hz (FTF) y la de 74 Hz que posiblemente se trate de la $BPTO \cdot 2$ debido a que es probable que el rodamiento tuviese algún defecto en la pista externa además del de pista interna. Frecuencias provocados por defectos en la pista externa también fueron detectados en las otras velocidades de ensayo.

4.2.4. Rodamiento con defecto en pista externa

La figura 4.28 representa los espectros de frecuencias pertenecientes a la velocidad de 30 Hz en los rodamientos con defecto en pista externa.

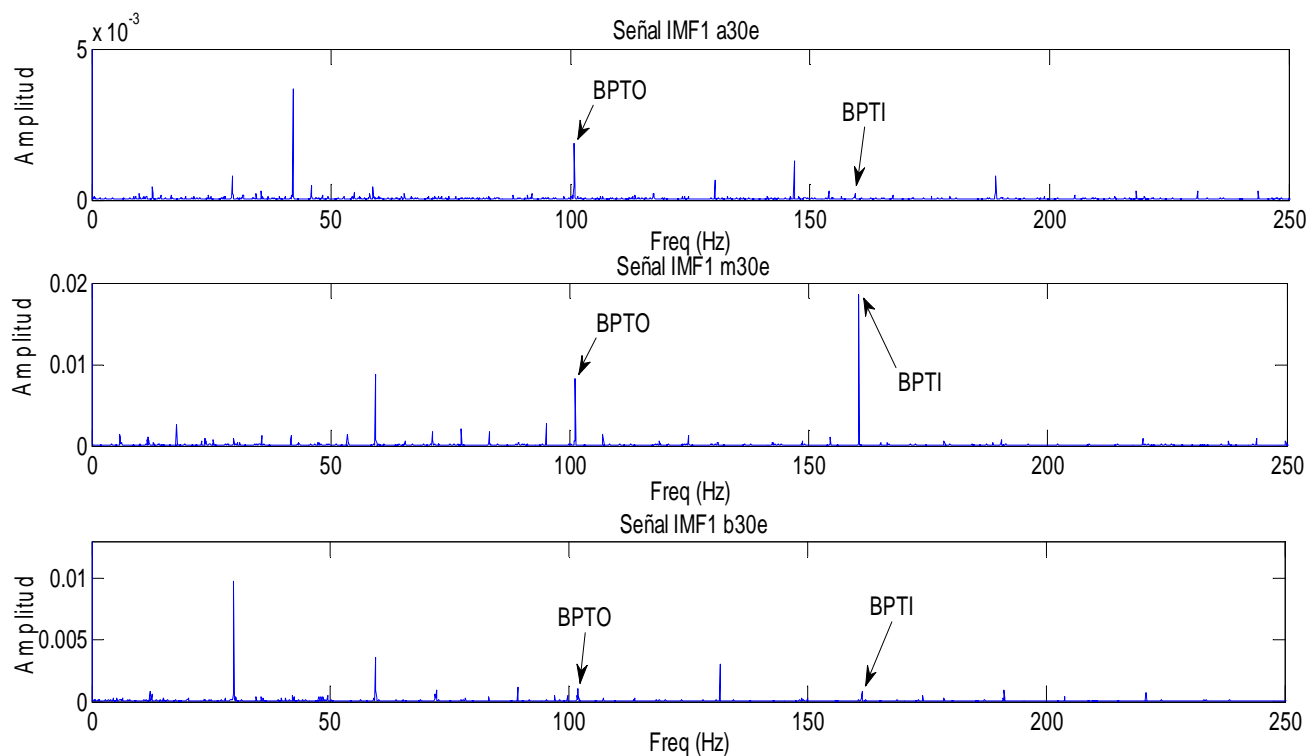


Figura 4.28. Espectro de frecuencias de las señales “a30e”, “m30e” y “b30e”

Se puede observar la BPTO, que a esta velocidad es de 107 Hz. En baja carga y media la amplitud es similar mientras que en alta carga la amplitud se ve reducida.

La BPTO se encontró para las tres velocidades.

La BPTI, 162 Hz a esta velocidad, también coincide en las tres cargas. También se identificó un armónico de BPTI para la velocidad de 10 Hz. Esto hace pensar que este rodamiento también tuviera algún defecto de pista interna.

También se pueden ver algunos armónicos de la velocidad de giro como 30 Hz y 60 Hz.



4.3. Análisis de la variación de carga

Después de conocer las frecuencias más significativas de las señales se va a proceder en este apartado a realizar un estudio comparativo de las amplitudes de dichas frecuencias en función de la carga que soportó el rodamiento.

Para este análisis en primer lugar se trocearon en las señales en 5 partes y después se les aplicó la transformada de Hilbert-Huang por separado a cada uno de los “trozos” de señal. El motivo de hacer el troceado de la señal es obtener una mayor cantidad de datos de la amplitud para cada frecuencia estudiada y así poder estudiar la media y la desviación típica de la amplitud con tamaño de muestras más representativo.

Para la toma de datos en cada una de las señales analizadas se obtuvieron los tres picos de mayor de amplitud y se anotó el valor de la frecuencia correspondiente.

Las tablas con todos los resultados se encuentran en el Anexo. A modo de ejemplo se presenta la tabla 4.5 de la toma de datos que corresponde con los tres mayores valores de amplitud del rodamiento con defecto en pista interna a 20 Hz para las tres configuraciones de carga:



- CAPÍTULO 4. ANÁLISIS EXPERIMENTAL -

Señal	b20i					
Tiempo de la muestra	Amplitud 1	Frecuencia 1 (Hz)	Amplitud 2	Frecuencia 2 (Hz)	Amplitud 3	Frecuencia 3 (Hz)
0 – 2 seg	1,08E-003	19,5	7,040E-04	67,5	6,177E-04	106,5
2 – 4 seg	6,685E-04	19,5	4,748E-04	67,5	1,007E-03	106,5
4 – 6 seg	9,354E-04	19,5	8,361E-04	67,5	7,652E-04	106,5
6 – 8 seg	9,391E-04	19,5	7,316E-04	67,5	7,520E-04	106,5
8 – 10 seg	1,111E-03	19,5	5,376E-04	67,5	3,724E-04	106,5
Media	9,472E-04	19,5	6,568E-04	67,5	7,029E-04	106,5
Desviación típica	1,753E-04	0,00	1,477E-04	0,00	2,320E-04	0,00
	velocidad de giro			BPTO		BPTI
Señal	m20i					
Tiempo de la muestra	Amplitud 1	Frecuencia 1 (Hz)	Amplitud 2	Frecuencia 2 (Hz)	Amplitud 3	Frecuencia 3 (Hz)
0 – 2 seg	4,755E-04	20	3,531E-04	67	3,862E-04	106,5
2 – 4 seg	3,425E-04	19,5	4,847E-04	67,5	2,426E-04	107
4 – 6 seg	6,375E-04	19,5	1,921E-04	67	2,914E-04	106,5
6 – 8 seg	3,785E-04	19,5	8,751E-04	67,5	6,436E-04	106,5
8 – 10 seg	9,158E-04	19,5	7,526E-04	67,5	4,443E-04	107
Media	5,500E-04	19,6	5,315E-04	67,3	4,016E-04	106,7
Desviación típica	2,342E-04	0,22	2,811E-04	0,27	1,566E-04	0,27
	velocidad de giro			BPTO		BPTI
Señal	a20i					
Tiempo de la muestra	Amplitud 1	Frecuencia 1 (Hz)	Amplitud 2	Frecuencia 2 (Hz)	Amplitud 3	Frecuencia 3 (Hz)
0 – 2 seg	1,817E-03	19,5	3,765E-04	66	3,630E-04	105
2 – 4 seg	8,933E-04	19,5	7,333E-04	66	8,945E-05	104,5
4 – 6 seg	7,611E-04	19,5	3,492E-04	66	1,801E-04	104,5
6 – 8 seg	9,237E-04	19,5	7,799E-04	66	1,722E-04	104,5
8 – 10 seg	1,619E-03	19,5	1,063E-03	66	1,304E-04	105
Media	1,203E-03	19,5	6,604E-04	66	1,870E-04	104,7
Desviación típica	4,794E-04	0,00	2,996E-04	0,00	1,048E-04	0,27
	velocidad de giro			BPTO		BPTI

Tabla 4.5. Toma de datos de las señales “b20i”, “m20i” y “a20i”

La causa correspondiente a cada frecuencia se muestra debajo del valor de ésta.

A continuación se representarán y comentarán las gráficas obtenidas a partir de estos datos con el objeto de estudiar la variación de la amplitud de los picos observados en función de la carga.

4.3.1. Rodamiento normal

En la figura 4.29 se representan las gráficas obtenidas para las velocidades de 10 Hz, 20 Hz y 30 Hz en el rodamiento normal.

Los puntos azules (cuadrados) corresponden a las señales de baja carga, los puntos rojos (rombos) a las señales de media carga mientras que los puntos amarillos (triángulos) a las señales de alta carga.

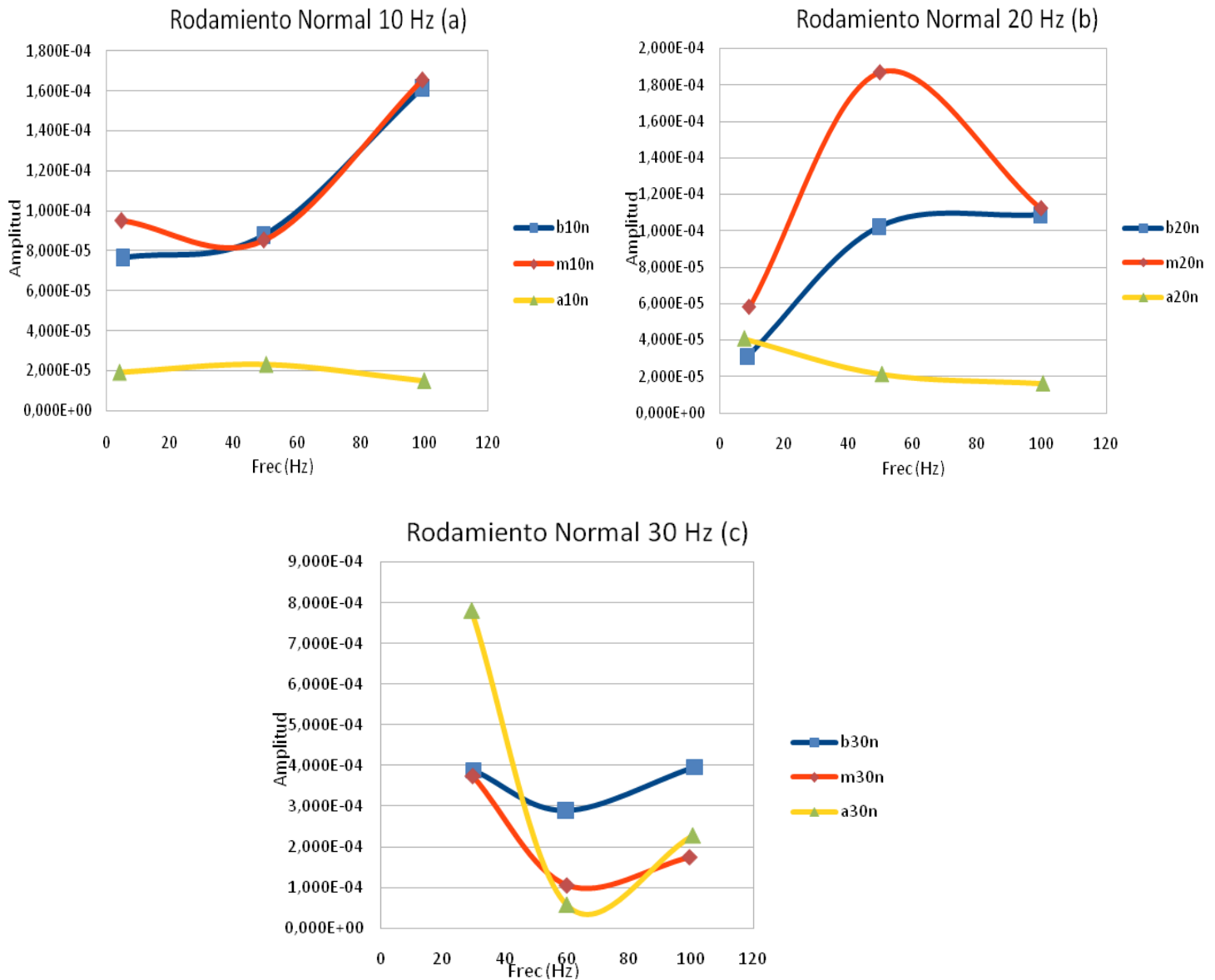


Figura 4.29. Gráficas Amplitud-Frecuencia del rodamiento normal a diferentes velocidades de giro

En la gráfica 4.29 (a) las frecuencias representadas son la FTF, la de red y el doble de la de red. Se observa como en baja y media carga la amplitud de estas frecuencias es similar mientras que en alta carga la amplitud resulta significativamente menor.



- CAPÍTULO 4. ANÁLISIS EXPERIMENTAL -

En la gráfica 4.29 (b), correspondiente a una velocidad de 20 Hz, las frecuencias mostradas son las mismas que en el caso anterior: la FTF, la de red y el doble de la de red. Aquí se puede observar como la mayor amplitud se encuentra en la configuración de media carga seguida baja carga y por último se encuentra alta carga con una amplitud menor.

En la gráfica 4.29 (c) se observa que al aumentar la velocidad las frecuencias de mayor amplitud varían ya que aquí se ven la frecuencia de velocidad de giro, el doble de ésta y el doble de la de red. No se observan tendencia para las tres frecuencias, en cada una de ellas el orden de la amplitud es diferente.

A la vista de las tres gráficas se puede decir que en el caso estudiado del rodamiento normal no se observa ninguna tendencia en función de la carga aplicada. El motivo es que al tratarse de un rodamiento sin defectos no se detectan fallos característicos del rodamiento con los que se pueda comparar la amplitud de éstos.

4.3.2. Rodamiento con defecto en bola

En la figura 4.30 se representan las gráficas obtenidas para las velocidades de 10 Hz en 4.30 (a), 20 Hz en 4.30 (b) y 30 Hz en 4.30 (c) para el rodamiento con defecto en bola. Como en caso anterior los puntos azules corresponden a las señales de baja carga, los puntos rojos a las señales de media carga mientras que los puntos amarillos a las señales de alta carga.

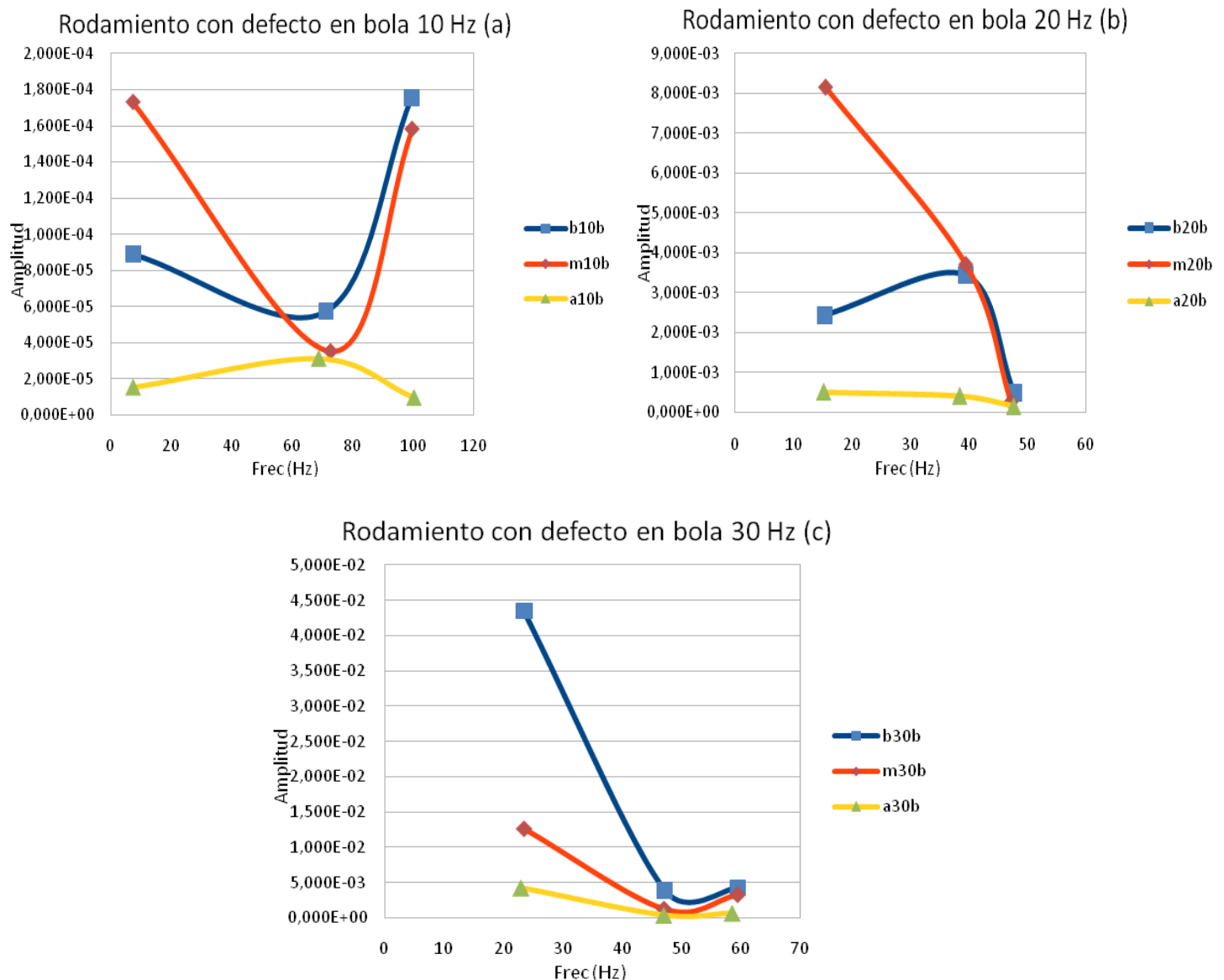


Figura 4.30. Gráficas Amplitud-Frecuencia del rodamiento con defecto en bola a diferentes velocidades de giro



- CAPÍTULO 4. ANÁLISIS EXPERIMENTAL -

En la gráfica de 10 Hz las frecuencias estudiadas son la $BSF/3$, la $BSF*3$ y el doble de la de red. Salvo para la frecuencia de $BSF/3$ el orden de la amplitud es, de mayor a menor, baja carga, media carga y alta carga. Para $BSF/3$ la mayor amplitud corresponde a media carga seguida de baja carga y alta carga.

En el caso de 20 Hz las frecuencias analizadas son $BSF/3$, la velocidad de giro y la BSF . El orden de amplitud para $BSF/3$ es el mismo que en el caso de 10 Hz, mientras que en la frecuencia de BSF se observa que el orden de amplitud es: baja carga, media carga y alta carga.

En la gráfica de 30 Hz las frecuencias estudiadas son la $BSF/3$, la de 47 Hz (quizás se trate de la de red) y el doble de la velocidad de giro. En las tres el orden de la amplitud es el siguiente: baja carga, media carga y alta carga.

Así, analizados los tres casos se observa una tendencia general en la que, a baja carga se observa mayor amplitud, seguida de media carga y por último se encuentra alta carga con la menor amplitud observada. Esta tendencia con la teoría de la elipse de contacto ya que al aumentar la carga las vibraciones del rodamiento son menores.

4.3.3. Rodamiento con defecto en pista interna

En la figura 4.31 se representan las gráficas obtenidas para las velocidades de 10 Hz, 20 Hz y 30 Hz en el rodamiento con defecto en bola. Al igual que los casos anteriores los puntos azules corresponden a las señales de baja carga, los puntos rojos a las señales de media carga mientras que los puntos amarillos a las señales de alta carga.

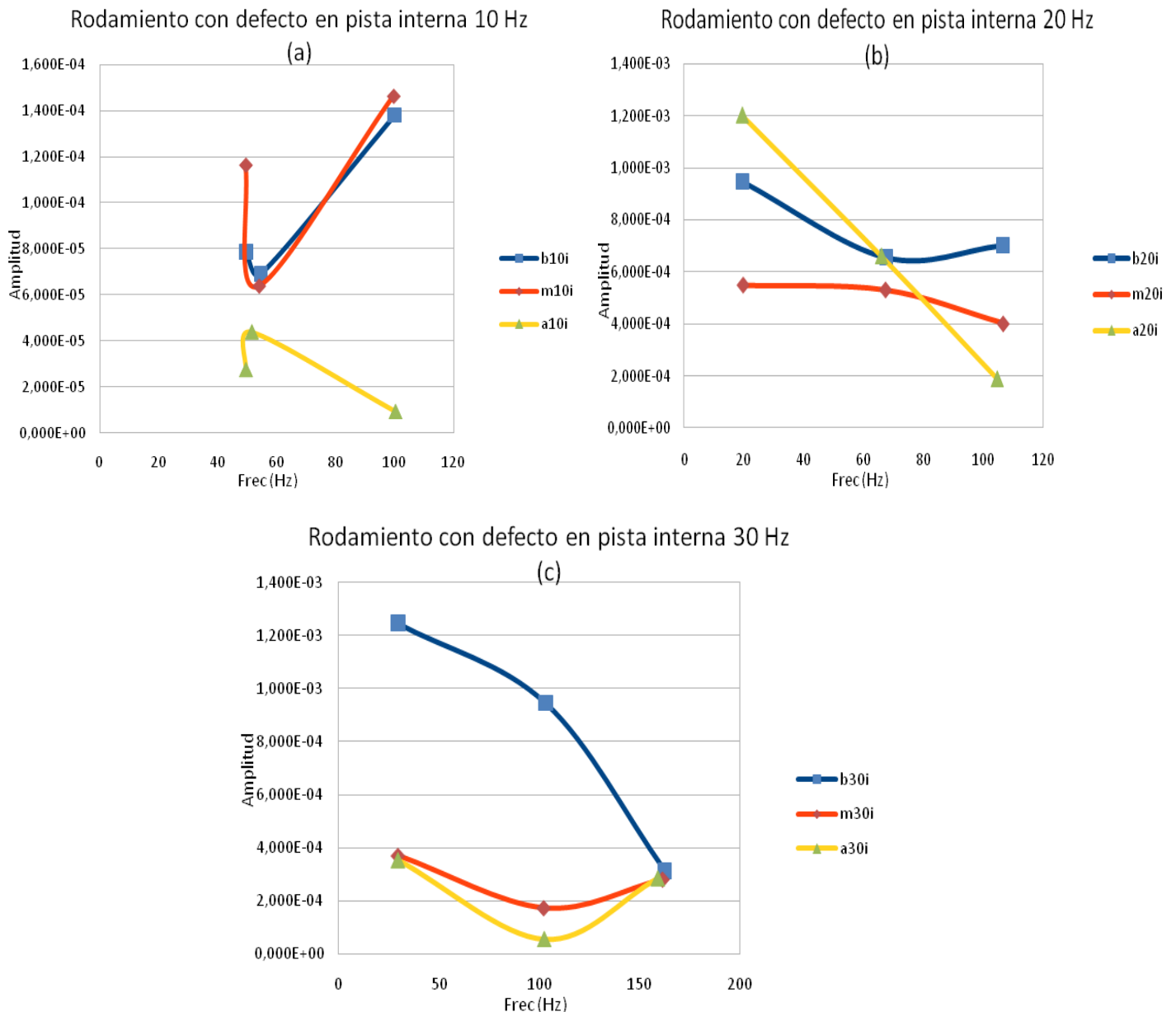


Figura 4.31. Gráficas Amplitud-Frecuencia del rodamiento con defecto en pista interna a diferentes velocidades



- CAPÍTULO 4. ANÁLISIS EXPERIMENTAL -

A 10 Hz, gráfica 4.31 (a), las frecuencias son la de red, la BPTI y el doble de la de red. Para la de red el orden de amplitud es: media carga, baja carga y alta carga. En cambio para las otras dos frecuencias se ve que en baja y media carga la amplitud mientras que en alta carga disminuye considerablemente la amplitud.

En la gráfica de 20 Hz, 4.31 (b), se representan las frecuencias de la velocidad de giro, la BPTO y la BPTI. Para la BPTI se observa que la mayor amplitud es para baja carga seguida de media carga y por último alta carga.

En el tercer caso, el de la velocidad de 30 Hz, gráfico 4.31 (c), las frecuencias son la velocidad de giro, la BPTO y la BPTI. Para las dos primeras frecuencias el orden de amplitud es: baja carga, media carga y alta carga. En la BPTI la mayor amplitud es la de baja carga seguida muy de cerca tanto por media carga como por alta carga, que presentan una amplitud similar.

A la vista de los datos comparados se observa como en la frecuencia de fallo de este rodamiento, la BPTI, el orden de amplitud es: baja carga, media carga y alta carga.

4.3.4 Rodamiento con defecto en pista externa

En la figura 4.32 se representan las gráficas obtenidas para las velocidades de 10 Hz, 20 Hz y 30 Hz en el rodamiento con defecto en bola. Al igual que los casos anteriores los puntos azules corresponden a las señales de baja carga, los puntos rojos a las señales de media carga mientras que los puntos amarillos a las señales de alta carga.

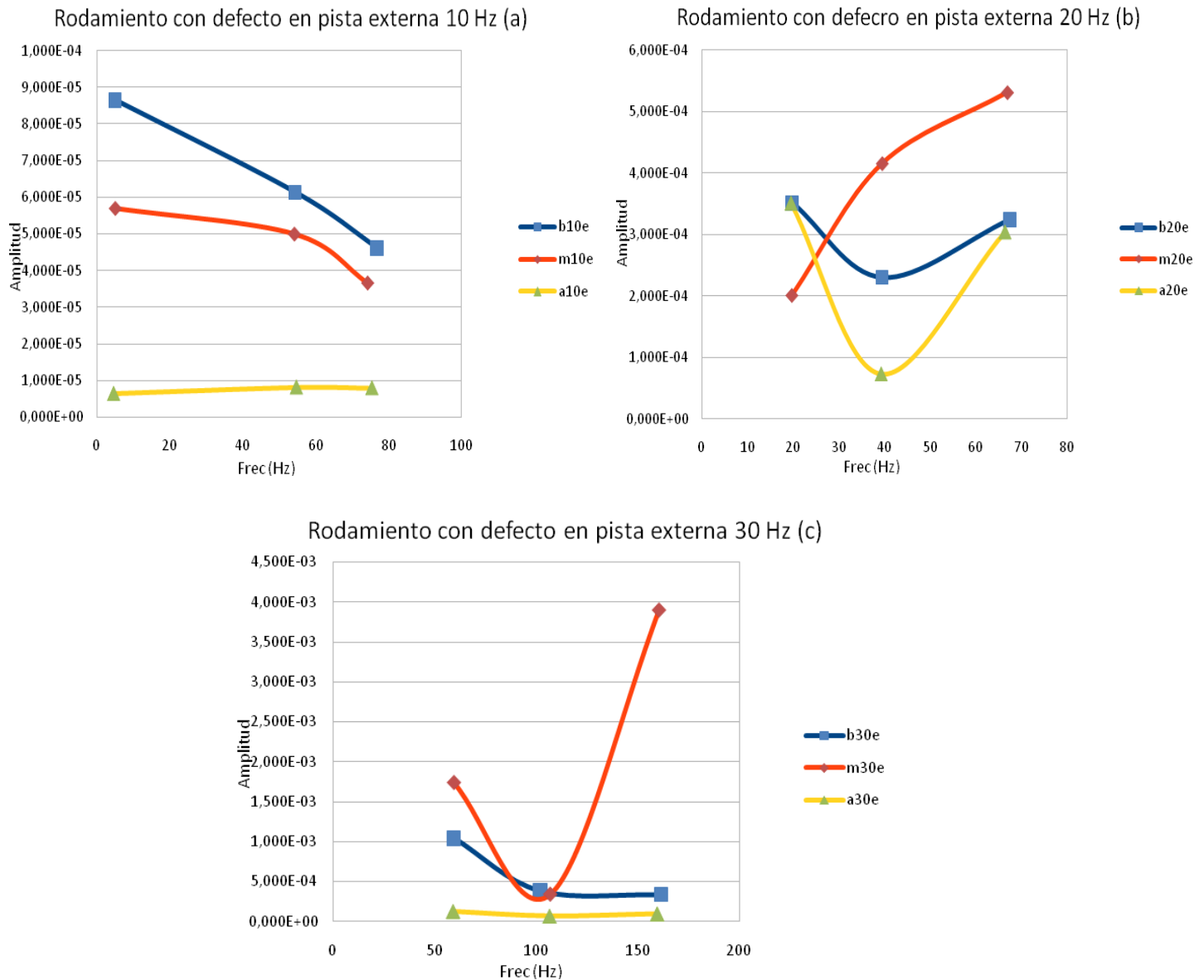


Figura 4.32. Gráficas Amplitud-Frecuencia del rodamiento con defecto en pista interna a diferentes velocidades



En la gráfica 4.32 (a), velocidad de 10 Hz, se muestran las frecuencias de FTF, la BPTI y el doble de la BPTO. En las tres frecuencias el orden de amplitud es el mismo, de mayor a menor: baja carga, media carga y alta carga.

A 20 Hz, gráfica 4.32 (b), las frecuencias de estudio son la velocidad de giro, el doble de la velocidad de giro y la BPTO. Salvo en la frecuencia de la velocidad de giro el orden de amplitud es: media carga, baja carga y alta carga.

Para 30 Hz, gráfica 4.32 (c), las frecuencias analizadas son el doble de la velocidad de giro, la BPTI y la BPTO. Para la frecuencia de la velocidad de giro y la BPTO el orden de amplitud es: media carga, baja carga y alta carga, mientras que en la BPTI el orden es: baja carga, media carga y alta carga.

Si se realiza una vista general de las tres gráficas no se observa tendencia de la amplitud aunque se puede afirmar que la configuración de alta carga presenta una menor amplitud que las otras dos configuraciones, baja y media carga.

4.4. Análisis de amplitudes según la variación de velocidad

A continuación se realizará un estudio de la amplitud obtenida de las señales en función de la velocidad de giro del rodamiento. Se estudiarán los casos en los que las frecuencias adquiridas de los espectros de frecuencia de Hilbert-Huang han coincidido para las tres configuraciones de carga (para una condición de rodamiento concreta), es decir, que es posible comparar la amplitud de cada configuración de carga en función de las tres velocidades: 10 Hz, 20 Hz y 30 Hz.

Los casos en los que ha sucedido esta coincidencia son tres, y se muestran y comentan a continuación.

En primer lugar se analizará el caso del rodamiento normal para la frecuencia del doble de la de red. Esta frecuencia es de 100 Hz, el doble de la de red, para las tres velocidades. Se muestra en la figura 4.33:

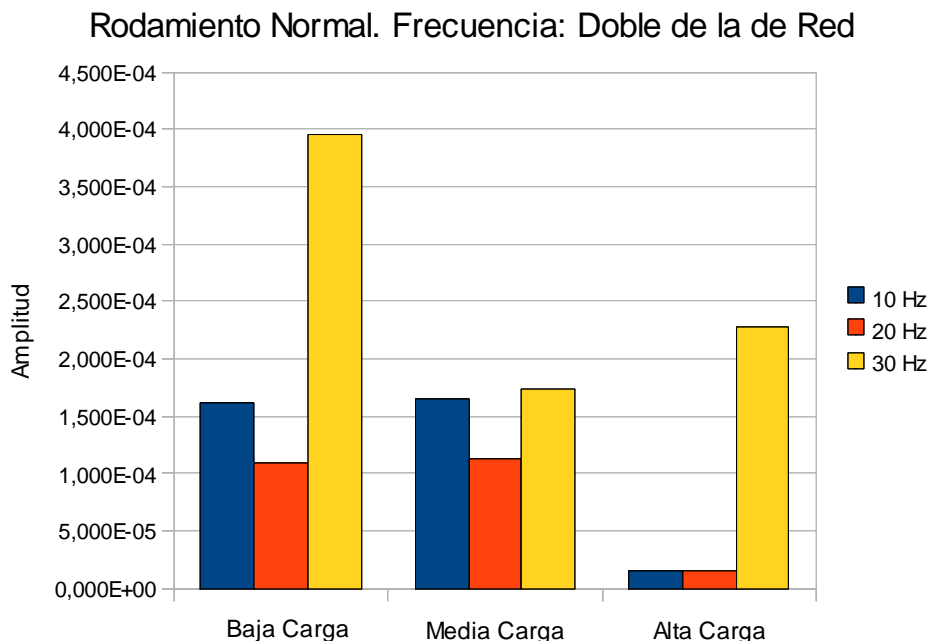


Figura 4.33. Gráfico de amplitud en función de la velocidad para el rodamiento normal para la frecuencia del doble de la de red

En la figura se observa que la mayor amplitud se da para la velocidad de 30 Hz en las tres configuraciones de carga. Comparando las velocidades de 10 Hz y 20 Hz se puede ver como es mayor la amplitud para 10 Hz en baja y media carga mientras que en alta carga es ligeramente superior la amplitud de 30 Hz.

No obstante los resultados obtenidos en este caso no son muy significativos ya que la frecuencia analizada es la del doble de la red y por lo tanto no aporta información acerca del rodamiento.

El siguiente caso estudiado, mostrado en la figura 4.34, es el del rodamiento con defecto en bola para la frecuencia de $BSF/3$. Esta frecuencia es de 7,5 Hz para la velocidad de giro 10 Hz, de 15,3 Hz para la velocidad de giro 20 Hz y de 23,5 Hz para la velocidad de giro 30 Hz.

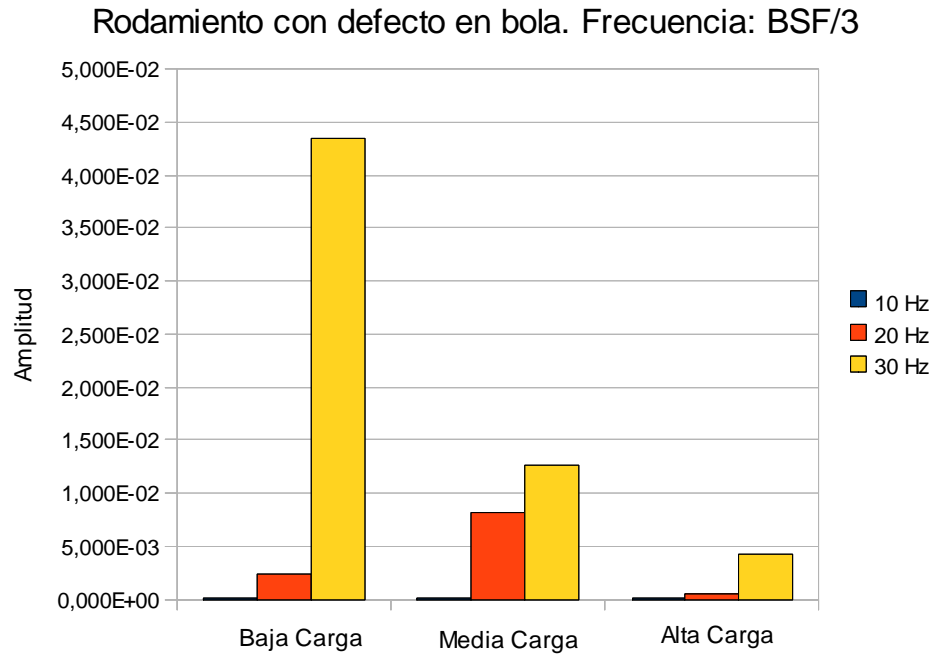


Figura 4.34. Gráfico de amplitud en función de la velocidad para el rodamiento con defecto en bola para la frecuencia BSF/3

En esta figura se observa claramente como el orden de amplitud en función de la velocidad es el mismo para las tres configuraciones de carga: 30 Hz mayor amplitud, 20 Hz amplitud intermedia y 10 Hz menor amplitud.

La tendencia observada en este caso es clara y significativa ya que la frecuencia estudiada se trata de un armónico de la BSF, que es la frecuencia de giro de los elementos rodantes.

El último caso analizado, presentado en la figura 4.35, será el del rodamiento con defecto en pista interna para la frecuencia BPTI. Esta frecuencia es de 54,2 Hz para la velocidad de giro 10 Hz, de 108,7 Hz para la velocidad de giro 20 Hz y de 162,7 Hz para la velocidad de giro 30 Hz.

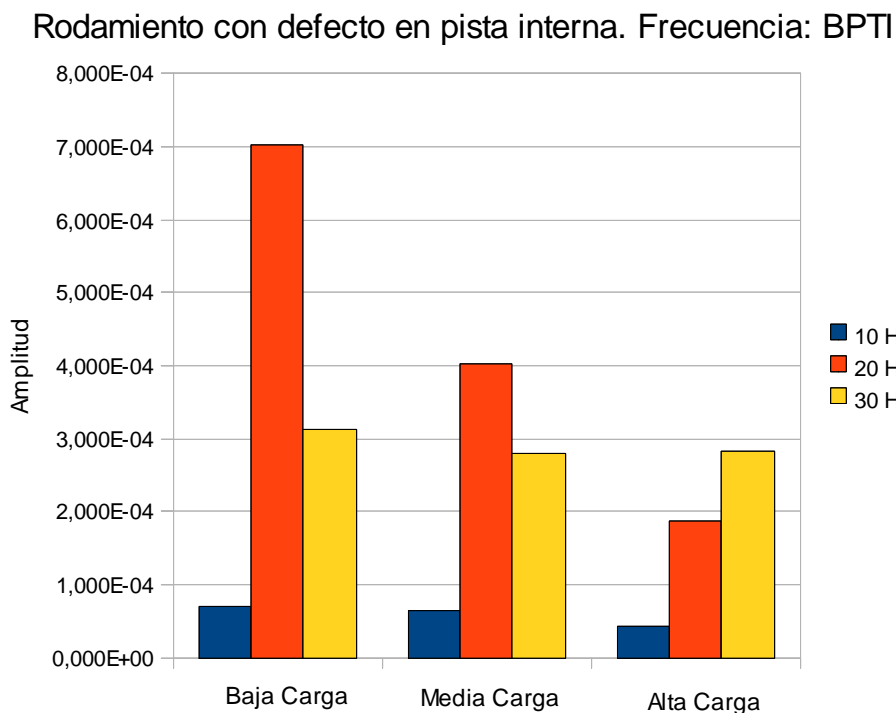


Figura 4.35. Gráfico de amplitud en función de la velocidad para el rodamiento con defecto en pista interna para la frecuencia BPTI

En el gráfico se ve que para las configuraciones de baja y media carga el orden de la amplitud en función de la velocidad de giro es, de mayor a menor valor: 20 Hz, 30 Hz y 10 Hz. En cambio en la configuración de alta carga el orden es, de mayor a menor valor: 30 Hz, 20 Hz y 10 Hz.

Haciendo un análisis general de los resultados obtenidos en este apartado se puede concluir que para la velocidad de giro de los rodamientos de 30 Hz se obtiene mayor amplitud, seguida de la velocidad de 20 Hz y con la menor amplitud se encuentra la velocidad de 10 Hz. Dado a que sólo se han estudiado tres casos para este análisis no se puede afirmar esta conclusión con rotundidad.

Haciendo un análisis global de los resultados obtenidos tras estudiar las señales vibratorias de los rodamientos en función de la configuración de carga y en función de la velocidad se puede concluir que las mayores amplitudes se han registrado para los casos de 30 Hz y para la configuración de baja carga.

5. CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

5.1. Conclusiones

El objetivo del proyecto era comparar las señales vibratorias extraídas de los rodamientos con y sin defectos en función de la carga que soportaba el rodamiento. También se realizó un análisis posterior de las vibraciones en función de la velocidad del rodamiento. Una vez estudiados todos los casos ensayados mediante la comparación de las amplitudes obtenidas por la transformada de Hilbert-Huang las conclusiones que se obtienen son las siguientes:

- En algunos casos ha resultado difícil identificar las frecuencias coincidentes debido a que las frecuencias de defecto o sus armónicos tenían un nivel de amplitud poco superior a las demás. Este hecho se ha notado sobretodo en alta carga debido a que, en general, la amplitud se encontraba muy por debajo de las otras dos.
- El motivo por el que a alta carga la amplitud de las frecuencias coincidentes es significativamente menor que en los otros dos casos (en algunos casos es un orden de magnitud inferior), es que a pesar de ser una carga mucho menor que la máxima tolerada por el rodamiento la elipse de contacto empieza a crecer, posiblemente supera en tamaño a la fisura del rodamiento y por lo tanto las vibraciones causadas por dicho defecto comienzan a estar atenuadas y son más difíciles de detectar mediante los espectros de frecuencia obtenidos mediante la transformada de Hilbert-Huang.
- Para rodamientos iguales y a igual velocidad de giro las frecuencias que han coincidido en las gráficas de las tres configuraciones de carga son las mismas tanto para el eje X como para el eje Y. Las amplitudes obtenidas para el eje X fueron superiores a las registradas para el eje Y. La causa de este efecto se puede explicar nuevamente con la teoría de la elipse de contacto: el eje Y, el vertical,



- CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS -

está más cargado que el eje X, el transversal, y por lo tanto la elipse de contacto es mayor y en consecuencia las vibraciones provocadas por los defectos de los rodamientos son menores en el eje Y que en el eje X.

- El defecto que con más claridad se ha detectado en este análisis ha sido el de pista interna, BPTI, mientras que en los defectos de pista externa y defecto en bola se han detectado con más claridad sus armónicos.
- En algunos casos del rodamiento con defecto en pista interna se identificaron, además de la propia frecuencia de fallo (BPTI), frecuencias provocadas por un defecto en pista externa (BPTO). Se observaron estos defectos para las velocidades de 600 rpm y 1.200 rpm. Del mismo modo para los casos de 600 rpm y 1.800 rpm del rodamiento con defecto en pista externa se observaron frecuencias causadas por un defecto en pista interna (BPTI). Esto hace pensar que en realidad estos rodamientos también presentaban otros defectos además de los que presentaban en principio.
- En la mayoría de los casos estudiados fue posible identificar para las tres configuraciones de carga la frecuencia de defecto correspondiente al rodamiento analizado, ya sea con la propia frecuencia de defecto o con un armónico de ésta. Los rodamientos “normales” no constaban de defectos, no obstante se identificó la FTF (frecuencia de rotación de la jaula que contiene los elementos rodantes). Haciendo un balance general se identificaron frecuencias de fallo en 33 de las 36 las gráficas de los espectros de frecuencias analizados (91,7%). En los rodamientos defectuosos la identificación de alguna frecuencia de fallo del rodamiento fue total, en 27 de 27 gráficas analizadas (100%).
- Respecto a la amplitud en función de las frecuencias coincidentes y a la vista de todos los casos estudiados se puede decir, en líneas generales, que en la configuración de baja carga hay más amplitud de las frecuencias coincidentes, seguido de cerca por media carga y con bastante menos amplitud se encontraron los casos de alta carga.



- En cuanto a la comparación realizada en función de la velocidad de giro de los rodamientos se observa que para los casos analizados la tendencia de la amplitud de las frecuencias estudiadas es que a 30 Hz (1.800 rpm) se obtienen mayores amplitudes, en segundo lugar están las señales de 20 Hz (1.200 rpm) y por último se encuentran las amplitudes obtenidas para la velocidad de 10 Hz (600 rpm). Es decir que a medida que aumenta la velocidad de giro de los rodamientos la amplitud mostrada por la transformada de Hilbert-Huang es mayor.

5.2. Futuros desarrollos

A la vista de los resultados y las conclusiones obtenidas en este proyecto el futuro desarrollo del estudio de las vibraciones en rodamientos defectuosos enmarcado en el mantenimiento predictivo son que:

- En cuanto al sistema experimental se podrían probar nuevos tipos de rodamientos donde los defectos estén controlados, ya que los ensayados en este proyecto fueron suministrados por el fabricante de la máquina, y no se sabe el tamaño de los defectos. Además en alguno de ellos se ha constatado que tenían otros defectos aparte de los que debían tener.
- Para el estudio estadístico sería una buena idea tomar mayor cantidad de datos con el objetivo de obtener una muestra más representativa. En el presente proyecto se tomaron 5 muestras para cada ensayo, lo que hace que en algunos casos la desviación típica sea parecida al valor de la amplitud. Al aumentar el número de muestras podría disminuir la desviación típica de los resultados.
- Después de observar los análisis y sus conclusiones, se propone que en los estudios que se realicen mediante la transformada de Hilbert-Huang, las señales tomadas deberán ser realizadas en condiciones en que el rodamiento estudiado no presente una carga importante ya que las amplitudes registradas serán



- CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS -

mayores que en el caso de que el rodamiento presente una carga significativa ya que en este caso las vibraciones emperezarán a ser sensibles al efecto de la elipse de contacto. También se deberán elegir las velocidades más altas en las que se pueda realizar el estudio del rodamiento, siempre que se pueda realizar en condiciones de seguridad.

6. BIBLIOGRAFÍA

[1] Omar José Lara Castro, “*Nuevas metodologías no invasivas en diagnosis de defectos incipientes en rodamientos de bola*”, Tesis Doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, mayo de 2.007.

[2] Jaime González Rodríguez, “*Aplicación del método Shock Pulse para la detección de defectos en rodamientos*”, Proyecto Final de Carrera, Universidad Carlos III de Madrid, 2.009.

[3] E. Estupiñan, P. Saavedra, “*Diagnostic techniques for the vibration analysis of bearings*”. Documento interno, Universidad de Tarapacá y Universidad de la Concepción, Chile, 2.007.

[4] Fonester, B. David, “*Advanced vibration analysis techniques for fault detection and diagnosis in geared transmission systems*”, Capítulo 4, PhDThesis, Swinburne University of Technology, Australia 1.996.

[5] Norden E. Huang, S.S.P. Shen. “*Interdisciplinary Mathematical Sciences Vol. 5, Introduction to the Hilbert-Huang transform and its related mathematical problems*”. Documento interno, Goddard Institute for Data Analysis, Code 614.2, NASA, 2.005.

[6] Jaime Salvadó Ruiz, Marcos Rodríguez Millán, Álvaro Vaz-Romero Santero, “*Máquina de simulación de fallos*”. Trabajo Dirigido del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid, 2.008.

[7] Catálogo de rodamientos de la empresa MB Manufacturing. Pdf disponible en Internet, http://www.alliedbearings.com/mfg_prod/rexnord_main/mb_brgs.pdf. Última visita: 6 de Octubre de 2.010.



- CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA -

[8] Polikar.R. The Wavelet tutorial. Rowan University. College of Engineering, 1.999.
Disponible en Internet, <http://users.rowan.edu/~polikar/WAVELETS/WTtutorial.html>.
Última visita: 6 Octubre de 2.010.

Selection Guide – pages 4-9
Load Ratings – pages 40-41
Additional Information – page 42



MOUNTED BALL BEARINGS – LOAD RATINGS

Basic size	Co Static load rating		C Basic load rating		Approximate speed limit RPM [*]			d Ball diameter inches	N Number of balls	Nd ²
	Newtons	pounds	Newtons	pounds	N seals	E,E1 seals	Flingers only			
203	4940	1110	8100	1820	14000	9000	15800	19/64	7	0.617
204	6590	1480	9830	2210	10000	7500	13400	5/16	8	0.781
205	7830	1760	10810	2430	9600	6800	11400	5/16	9	0.879
206	11300	2530	15030	3380	8000	5600	9800	3/8	9	1.27
207	15300	3440	19880	4470	6850	4800	8400	7/16	9	1.72
208	19900	4460	25100	5640	6000	4500	7500	1/2	9	2.25
209	20400	4590	25220	5670	5330	4000	6800	1/2	9	2.25
210	23200	5220	27090	6090	4800	3600	6400	1/2	10	2.50
211	29200	6570	33540	7540	4360	3200	5800	9/16	10	3.16
212	36000	8080	40520	9110	4000	3000	5300	5/8	10	3.91
					K seals	TFF seals	Flingers only			
214	38300	8620	48000	10800	3050	2850	4600	11/16	10	4.73
215	37600	8460	47600	10700	2900	2700	4400	11/16	10	4.73
216	50700	11400	59600	13400	2700	2550	4050	3/4	11	6.19
218	64000	14400	73800	16600	2400	2250	3600	7/8	10	7.66

If the load is greater than .15C for 25/35 series or .25C for all others, consult Rexnord Bearing Products.

* Approximate speed limits are based on grease lubrication and moderate load.



Anexo B. Tablas de los resultados de los análisis

Señal	b10n					
Tiempo de la muestra	Amplitud 1	Frecuencia 1 (Hz)	Amplitud 2	Frecuencia 2 (Hz)	Amplitud 3	Frecuencia 3 (Hz)
0 – 2 seg	9,302E-05	6	1,170E-04	49,5	2,272E-04	99
2 – 4 seg	6,513E-05	5,5	4,313E-05	49	1,643E-04	99,5
4 – 6 seg	9,988E-05	4,5	1,163E-04	49,5	1,645E-04	99
6 – 8 seg	5,542E-05	5	7,173E-05	49,5	1,421E-04	99,5
8 – 10 seg	7,032E-05	5	9,106E-05	49,5	1,085E-04	99,5
Media	7,675E-05	5,2	8,784E-05	49,4	1,613E-04	99,3
Desviación típica	1,891E-05	0,57	3,134E-05	0,22	4,335E-05	0,27
		FTF		red		Red*2
Señal	m10n					
Tiempo de la muestra	Amplitud 1	Frecuencia 1 (Hz)	Amplitud 2	Frecuencia 2 (Hz)	Amplitud 3	Frecuencia 3 (Hz)
0 – 2 seg	1,044E-04	5	8,401E-05	49,5	2,101E-04	99
2 – 4 seg	1,061E-04	5	4,524E-05	50	1,518E-04	99
4 – 6 seg	8,628E-05	4,5	8,854E-05	49,5	1,950E-04	99,5
6 – 8 seg	8,140E-05	5	5,067E-05	49,5	1,157E-04	100
8 – 10 seg	9,669E-05	4,5	1,575E-04	49,5	1,557E-04	100
Media	9,497E-05	4,8	8,519E-05	49,6	1,657E-04	99,5
Desviación típica	1,090E-05	0,27	4,480E-05	0,22	3,749E-05	0,50
		FTF		red		Red*2
Señal	a10n					
Tiempo de la muestra	Amplitud 1	Frecuencia 1 (Hz)	Amplitud 2	Frecuencia 2 (Hz)	Amplitud 3	Frecuencia 3 (Hz)
0 – 2 seg	3,233E-05	4	6,569E-05	49,5	2,852E-05	100,5
2 – 4 seg	1,140E-05	4	1,043E-05	50	1,023E-05	99,5
4 – 6 seg	2,620E-05	4	1,122E-05	49,5	1,727E-05	99,5
6 – 8 seg	9,342E-06	4,5	1,890E-05	49,5	6,201E-06	100
8 – 10 seg	1,764E-05	4	1,073E-05	52,5	1,343E-05	100
Media	1,938E-05	4,1	2,339E-05	50,2	1,513E-05	99,9
Desviación típica	9,768E-06	0,22	2,391E-05	1,30	8,522E-06	0,42
		FTF		red		Red*2
Señal	b10b					
Tiempo de la muestra	Amplitud 1	Frecuencia 1 (Hz)	Amplitud 2	Frecuencia 2 (Hz)	Amplitud 3	Frecuencia 3 (Hz)
0 – 2 seg	6,375E-05	8	6,295E-05	69,5	2,631E-04	99
2 – 4 seg	9,186E-05	4,5	3,839E-05	73,5	1,150E-04	99,5
4 – 6 seg	7,279E-05	9	8,667E-05	74	1,738E-04	99
6 – 8 seg	1,151E-04	8	5,110E-05	69	9,374E-05	100
8 – 10 seg	1,026E-04	8	4,847E-05	70	2,312E-04	99,5
Media	8,922E-05	7,5	5,752E-05	71,2	1,754E-04	99,4
Desviación típica	2,106E-05	1,73	1,850E-05	2,36	7,267E-05	0,42
		BSF/3		BSF*3		Red*2
Señal	m10b					
Tiempo de la muestra	Amplitud 1	Frecuencia 1 (Hz)	Amplitud 2	Frecuencia 2 (Hz)	Amplitud 3	Frecuencia 3 (Hz)
0 – 2 seg	1,792E-04	7,5	4,955E-05	74	2,355E-04	99,5
2 – 4 seg	6,331E-05	6	2,085E-05	73	5,510E-05	99,5
4 – 6 seg	1,648E-04	8	3,948E-05	71	2,384E-04	100
6 – 8 seg	2,197E-04	8	3,199E-05	70,5	1,078E-04	100
8 – 10 seg	2,382E-04	8	3,423E-05	75	1,538E-04	99
Media	1,730E-04	7,5	3,522E-05	72,7	1,581E-04	99,6
Desviación típica	6,813E-05	0,87	1,050E-05	1,92	7,999E-05	0,42
		BSF/3		BSF*3		Red*2
Señal	a10b					
Tiempo de la muestra	Amplitud 1	Frecuencia 1 (Hz)	Amplitud 2	Frecuencia 2 (Hz)	Amplitud 3	Frecuencia 3 (Hz)
0 – 2 seg	1,432E-05	7,5	2,066E-05	65	7,541E-06	99,5
2 – 4 seg	7,768E-06	7	2,970E-05	67	1,828E-05	100,5
4 – 6 seg	2,586E-05	7	3,020E-05	69	1,066E-06	100
6 – 8 seg	1,185E-05	7,5	3,979E-05	71	1,529E-05	100,5
8 – 10 seg	1,750E-05	7,5	3,669E-05	71	6,679E-06	100
Media	1,546E-05	7,3	3,141E-05	68,6	9,771E-06	100,1
Desviación típica	6,816E-06	0,27	7,383E-06	2,61	6,949E-06	0,42
		BSF/3		BSF*3		Red*2



- ANEXOS -

Señal	b10i					
Tiempo de la muestra	Amplitud 1	Frecuencia 1 (Hz)	Amplitud 2	Frecuencia 2 (Hz)	Amplitud 3	Frecuencia 3 (Hz)
0 – 2 seg	1,175E-04	49,5	5,793E-05	54	1,210E-04	100
2 – 4 seg	7,319E-05	49,5	4,450E-05	56	1,563E-04	100
4 – 6 seg	1,286E-04	49,5	1,346E-04	54	1,663E-04	100
6 – 8 seg	3,549E-05	50,5	4,564E-05	55	1,094E-04	100
8 – 10 seg	3,847E-05	49,5	6,273E-05	54	1,373E-04	100
Media	7,865E-05	49,7	6,908E-05	54,6	1,381E-04	100
Desviación típica	4,333E-05	0,45	3,745E-05	0,89	2,368E-05	0,00
		red		BPTI		Red*2

Señal	m10i					
Tiempo de la muestra	Amplitud 1	Frecuencia 1 (Hz)	Amplitud 2	Frecuencia 2 (Hz)	Amplitud 3	Frecuencia 3 (Hz)
0 – 2 seg	1,324E-04	49,5	7,017E-05	54	1,613E-04	99,5
2 – 4 seg	1,412E-04	49,5	6,967E-05	54	1,461E-04	100
4 – 6 seg	8,953E-05	49,5	9,494E-05	54	1,467E-04	99
6 – 8 seg	1,065E-04	49,5	4,636E-05	54	1,278E-04	99,5
8 – 10 seg	1,123E-04	49,5	3,809E-05	54	1,496E-04	100
Media	1,164E-04	49,5	6,385E-05	54	1,463E-04	99,6
Desviación típica	2,066E-05	0,00	2,242E-05	0,00	1,202E-05	0,42
		red		BPTI		Red*2

Señal	a10i					
Tiempo de la muestra	Amplitud 1	Frecuencia 1 (Hz)	Amplitud 2	Frecuencia 2 (Hz)	Amplitud 3	Frecuencia 3 (Hz)
0 – 2 seg	1,402E-05	49,5	1,998E-05	51,5	1,484E-05	100
2 – 4 seg	1,100E-05	49	3,924E-05	51,5	7,002E-06	100,5
4 – 6 seg	8,519E-05	50	2,458E-05	51,5	7,270E-06	100
6 – 8 seg	2,140E-05	49,5	8,798E-05	51,5	1,040E-05	100
8 – 10 seg	5,821E-06	49,5	4,791E-05	51,5	6,601E-06	101
Media	2,749E-05	49,5	4,394E-05	51,5	9,223E-06	100,3
Desviación típica	3,275E-05	0,35	2,705E-05	0,00	3,484E-06	0,45
		red		BPTI		Red*2

Señal	b10e					
Tiempo de la muestra	Amplitud 1	Frecuencia 1 (Hz)	Amplitud 2	Frecuencia 2 (Hz)	Amplitud 3	Frecuencia 3 (Hz)
0 – 2 seg	5,025E-05	6	7,466E-05	54	1,147E-04	78,5
2 – 4 seg	1,357E-04	4,5	1,034E-04	54	4,562E-05	78,5
4 – 6 seg	4,570E-05	5	4,255E-05	54	2,191E-05	76,5
6 – 8 seg	1,591E-04	5	5,926E-05	54,5	3,694E-05	75
8 – 10 seg	4,164E-05	4,5	2,692E-05	55	1,161E-05	75,5
Media	8,648E-05	5	6,136E-05	54,3	4,616E-05	76,8
Desviación típica	5,631E-05	0,61	2,953E-05	0,45	4,051E-05	1,64
		FTF		BPTI		BPTO*2

Señal	m10e					
Tiempo de la muestra	Amplitud 1	Frecuencia 1 (Hz)	Amplitud 2	Frecuencia 2 (Hz)	Amplitud 3	Frecuencia 3 (Hz)
0 – 2 seg	6,188E-05	5,5	7,851E-05	54,5	3,307E-05	75
2 – 4 seg	4,247E-05	4,5	3,317E-05	54,5	2,986E-05	74
4 – 6 seg	1,953E-05	4,5	1,752E-05	55	2,564E-05	74
6 – 8 seg	4,369E-05	6	4,417E-05	53	4,108E-05	74,5
8 – 10 seg	1,175E-04	4,5	7,651E-05	54	5,311E-05	74
Media	5,701E-05	5	4,998E-05	54,2	3,655E-05	74,3
Desviación típica	3,700E-05	0,71	2,687E-05	0,76	1,085E-05	0,45
		FTF		BPTI		BPTO*2

Señal	a10e					
Tiempo de la muestra	Amplitud 1	Frecuencia 1 (Hz)	Amplitud 2	Frecuencia 2 (Hz)	Amplitud 3	Frecuencia 3 (Hz)
0 – 2 seg	1,756E-06	4	4,687E-06	55,5	6,008E-06	73
2 – 4 seg	8,103E-06	4	1,481E-05	56,5	1,181E-05	76
4 – 6 seg	7,992E-06	3,5	6,605E-06	55,5	9,403E-06	75
6 – 8 seg	6,447E-06	6	7,323E-06	52,5	5,013E-06	78
8 – 10 seg	7,579E-06	5,5	7,359E-06	53,5	7,467E-06	75
Media	6,375E-06	4,6	8,157E-06	54,7	7,940E-06	75,4
Desviación típica	2,664E-06	1,08	3,874E-06	1,64	2,722E-06	1,82
		FTF		BPTI		BPTO*2



- ANEXOS -

Señal	b20n					
Tiempo de la muestra	Amplitud 1	Frecuencia 1 (Hz)	Amplitud 2	Frecuencia 2 (Hz)	Amplitud 3	Frecuencia 3 (Hz)
0 – 2 seg	3,67E-005	8	6,882E-05	49,5	1,383E-04	99,5
2 – 4 seg	1,651E-05	8	8,687E-05	49,5	1,247E-04	99,5
4 – 6 seg	1,921E-05	8	1,085E-04	49,5	1,009E-04	99,5
6 – 8 seg	4,216E-05	9	9,476E-05	49,5	8,086E-05	99,5
8 – 10 seg	4,087E-05	9,5	1,527E-04	49,5	9,936E-05	99,5
Media	3,109E-05	8,5	1,023E-04	49,5	1,088E-04	99,5
Desviación típica	1,228E-05	0,71	3,160E-05	0,00	2,267E-05	0,00
		FTF		red		Red*2
Señal	m20n					
Tiempo de la muestra	Amplitud 1	Frecuencia 1 (Hz)	Amplitud 2	Frecuencia 2 (Hz)	Amplitud 3	Frecuencia 3 (Hz)
0 – 2 seg	3,420E-05	9,5	3,620E-04	49,5	1,416E-04	99,5
2 – 4 seg	6,544E-05	10,5	1,108E-04	50,5	8,441E-05	100
4 – 6 seg	8,143E-05	9,5	2,561E-04	49,5	1,576E-04	99,5
6 – 8 seg	4,185E-05	8	1,146E-04	49,5	1,033E-04	99,5
8 – 10 seg	6,794E-05	8	9,053E-05	49,5	7,435E-05	100
Media	5,817E-05	9,1	1,868E-04	49,7	1,123E-04	99,7
Desviación típica	1,956E-05	1,08	1,181E-04	0,45	3,609E-05	0,27
		FTF		red		Red*2
Señal	a20n					
Tiempo de la muestra	Amplitud 1	Frecuencia 1 (Hz)	Amplitud 2	Frecuencia 2 (Hz)	Amplitud 3	Frecuencia 3 (Hz)
0 – 2 seg	2,508E-05	7,5	3,280E-05	50	9,856E-06	99,5
2 – 4 seg	2,732E-05	7,5	1,399E-05	50,5	2,307E-05	100,5
4 – 6 seg	9,400E-05	8	1,491E-05	50	1,710E-05	99,5
6 – 8 seg	4,018E-05	8	3,570E-05	49,5	1,815E-05	100
8 – 10 seg	1,751E-05	6,5	9,577E-06	51	1,343E-05	101,5
Media	4,082E-05	7,5	2,140E-05	50,2	1,632E-05	100,2
Desviación típica	3,083E-05	0,61	1,195E-05	0,57	4,991E-06	0,84
		FTF		red		Red*2
Señal	b20b					
Tiempo de la muestra	Amplitud 1	Frecuencia 1 (Hz)	Amplitud 2	Frecuencia 2 (Hz)	Amplitud 3	Frecuencia 3 (Hz)
0 – 2 seg	1,76E-003	15,5	2,239E-03	39,5	8,897E-04	47,5
2 – 4 seg	1,539E-03	15,5	9,986E-03	39,5	5,011E-04	47,5
4 – 6 seg	1,349E-03	15,5	1,125E-03	39,5	3,989E-04	47,5
6 – 8 seg	7,043E-03	15,5	2,208E-03	39,5	3,541E-04	48,5
8 – 10 seg	4,746E-04	14,5	1,655E-03	39,5	3,117E-04	48
Media	2,433E-03	15,3	3,443E-03	39,5	4,911E-04	47,8
Desviación típica	2,623E-03	0,45	3,686E-03	0,00	2,337E-04	0,45
		BSF/3		velocidad de giro*2		BSF
Señal	m20b					
Tiempo de la muestra	Amplitud 1	Frecuencia 1 (Hz)	Amplitud 2	Frecuencia 2 (Hz)	Amplitud 3	Frecuencia 3 (Hz)
0 – 2 seg	1,123E-03	15,5	2,209E-03	39,5	2,679E-04	48
2 – 4 seg	8,822E-03	15,5	3,679E-03	39,5	1,870E-04	48
4 – 6 seg	3,058E-03	15,5	3,042E-03	39,5	3,077E-04	46,5
6 – 8 seg	1,220E-02	15,5	5,271E-03	39,5	2,727E-04	46
8 – 10 seg	1,561E-02	15,5	4,373E-03	39,5	2,643E-04	47,5
Media	8,163E-03	15,5	3,715E-03	39,5	2,599E-04	47,2
Desviación típica	6,079E-03	0,00	1,181E-03	0,00	4,429E-05	0,91
		BSF/3		velocidad de giro*2		BSF
Señal	a20b					
Tiempo de la muestra	Amplitud 1	Frecuencia 1 (Hz)	Amplitud 2	Frecuencia 2 (Hz)	Amplitud 3	Frecuencia 3 (Hz)
0 – 2 seg	5,278E-04	15	4,180E-04	38,5	7,032E-05	47
2 – 4 seg	1,698E-04	15	5,597E-04	38,5	2,669E-04	48
4 – 6 seg	1,069E-03	15	4,470E-04	38,5	1,948E-04	48
6 – 8 seg	4,756E-04	15,5	3,747E-04	38,5	1,405E-04	47
8 – 10 seg	3,200E-04	15,5	2,612E-04	38	1,071E-04	48
Media	5,124E-04	15,2	4,121E-04	38,4	1,559E-04	47,6
Desviación típica	3,412E-04	0,27	1,086E-04	0,22	7,710E-05	0,55
		BSF/3		velocidad de giro*2		BSF



- ANEXOS -

Señal	b20i					
Tiempo de la muestra	Amplitud 1	Frecuencia 1 (Hz)	Amplitud 2	Frecuencia 2 (Hz)	Amplitud 3	Frecuencia 3 (Hz)
0 – 2 seg	1,08E-003	19,5	7,040E-04	67,5	6,177E-04	106,5
2 – 4 seg	6,685E-04	19,5	4,748E-04	67,5	1,007E-03	106,5
4 – 6 seg	9,354E-04	19,5	8,361E-04	67,5	7,652E-04	106,5
6 – 8 seg	9,391E-04	19,5	7,316E-04	67,5	7,520E-04	106,5
8 – 10 seg	1,111E-03	19,5	5,376E-04	67,5	3,724E-04	106,5
Media	9,472E-04	19,5	6,568E-04	67,5	7,029E-04	106,5
Desviación típica	1,753E-04	0,00	1,477E-04	0,00	2,320E-04	0,00
	velocidad de giro		BPTO		BPTI	
Señal	m20i					
Tiempo de la muestra	Amplitud 1	Frecuencia 1 (Hz)	Amplitud 2	Frecuencia 2 (Hz)	Amplitud 3	Frecuencia 3 (Hz)
0 – 2 seg	4,755E-04	20	3,531E-04	67	3,862E-04	106,5
2 – 4 seg	3,425E-04	19,5	4,847E-04	67,5	2,426E-04	107
4 – 6 seg	6,375E-04	19,5	1,921E-04	67	2,914E-04	106,5
6 – 8 seg	3,785E-04	19,5	8,751E-04	67,5	6,436E-04	106,5
8 – 10 seg	9,158E-04	19,5	7,526E-04	67,5	4,443E-04	107
Media	5,500E-04	19,6	5,315E-04	67,3	4,016E-04	106,7
Desviación típica	2,342E-04	0,22	2,811E-04	0,27	1,566E-04	0,27
	velocidad de giro		BPTO		BPTI	
Señal	a20i					
Tiempo de la muestra	Amplitud 1	Frecuencia 1 (Hz)	Amplitud 2	Frecuencia 2 (Hz)	Amplitud 3	Frecuencia 3 (Hz)
0 – 2 seg	1,817E-03	19,5	3,765E-04	66	3,630E-04	105
2 – 4 seg	8,933E-04	19,5	7,333E-04	66	8,945E-05	104,5
4 – 6 seg	7,611E-04	19,5	3,492E-04	66	1,801E-04	104,5
6 – 8 seg	9,237E-04	19,5	7,799E-04	66	1,722E-04	104,5
8 – 10 seg	1,619E-03	19,5	1,063E-03	66	1,304E-04	105
Media	1,203E-03	19,5	6,604E-04	66	1,870E-04	104,7
Desviación típica	4,794E-04	0,00	2,996E-04	0,00	1,048E-04	0,27
	velocidad de giro		BPTO		BPTI	
Señal	b20e					
Tiempo de la muestra	Amplitud 1	Frecuencia 1 (Hz)	Amplitud 2	Frecuencia 2 (Hz)	Amplitud 3	Frecuencia 3 (Hz)
0 – 2 seg	3,73E-004	20	2,145E-04	39,5	4,155E-04	67,5
2 – 4 seg	2,954E-04	19,5	2,138E-04	39,5	4,379E-04	67,5
4 – 6 seg	4,014E-04	20	2,766E-04	39,5	3,581E-04	67,5
6 – 8 seg	2,801E-04	19,5	1,739E-04	39,5	2,112E-04	67,5
8 – 10 seg	4,052E-04	20	2,738E-04	39,5	1,994E-04	67,5
Media	3,510E-04	19,8	2,305E-04	39,5	3,244E-04	67,5
Desviación típica	5,934E-05	0,27	4,398E-05	0,00	1,126E-04	0,00
	velocidad de giro		velocidad de giro*2		BPTO	
Señal	m20e					
Tiempo de la muestra	Amplitud 1	Frecuencia 1 (Hz)	Amplitud 2	Frecuencia 2 (Hz)	Amplitud 3	Frecuencia 3 (Hz)
0 – 2 seg	2,057E-04	19	1,605E-04	39,5	5,966E-04	67
2 – 4 seg	1,190E-04	19	7,453E-04	39,5	4,928E-04	67
4 – 6 seg	1,762E-04	20,5	1,036E-04	39,5	8,048E-04	67
6 – 8 seg	2,622E-04	20	1,126E-04	39,5	2,392E-04	66,5
8 – 10 seg	2,412E-04	20	9,551E-04	39,5	5,206E-04	67
Media	2,009E-04	19,7	4,154E-04	39,5	5,308E-04	66,9
Desviación típica	5,640E-05	0,67	4,043E-04	0,00	2,037E-04	0,22
	velocidad de giro		velocidad de giro*2		BPTO	
Señal	a20e					
Tiempo de la muestra	Amplitud 1	Frecuencia 1 (Hz)	Amplitud 2	Frecuencia 2 (Hz)	Amplitud 3	Frecuencia 3 (Hz)
0 – 2 seg	3,970E-04	19,5	5,287E-05	41,5	3,056E-04	66,5
2 – 4 seg	3,740E-04	19,5	7,333E-05	39,5	3,085E-04	66,5
4 – 6 seg	2,997E-04	19,5	1,007E-04	38,5	3,492E-04	66,5
6 – 8 seg	3,543E-04	19,5	9,842E-05	38	3,327E-04	66,5
8 – 10 seg	3,306E-04	19,5	4,310E-05	39	2,245E-04	66,5
Media	3,511E-04	19,5	7,368E-05	39,3	3,041E-04	66,5
Desviación típica	3,776E-05	0,00	2,603E-05	1,35	4,798E-05	0,00
	velocidad de giro		velocidad de giro*2		BPTO	



- ANEXOS -

Señal	b30n					
Tiempo de la muestra	Amplitud 1	Frecuencia 1 (Hz)	Amplitud 2	Frecuencia 2 (Hz)	Amplitud 3	Frecuencia 3 (Hz)
0 – 2 seg	1,59E-004	30	3,380E-04	59,5	1,712E-04	100
2 – 4 seg	3,785E-04	29,5	2,448E-04	59,5	3,440E-04	102
4 – 6 seg	4,128E-04	30	2,544E-04	59	9,239E-04	102
6 – 8 seg	6,545E-04	29,5	3,052E-04	60	2,540E-04	102
8 – 10 seg	3,337E-04	30	3,040E-04	59,5	2,834E-04	99,5
Media	3,876E-04	29,8	2,893E-04	59,5	3,953E-04	101,1
Desviación típica	1,784E-04	0,27	3,886E-05	0,35	3,020E-04	1,24
		velocidad de giro		velocidad de giro*2		Red*2
Señal	m30n					
Tiempo de la muestra	Amplitud 1	Frecuencia 1 (Hz)	Amplitud 2	Frecuencia 2 (Hz)	Amplitud 3	Frecuencia 3 (Hz)
0 – 2 seg	2,959E-04	29,5	9,426E-05	60	1,354E-04	99
2 – 4 seg	2,408E-04	30,5	2,527E-05	59,5	2,039E-04	99,5
4 – 6 seg	5,131E-04	29,5	9,860E-05	60,5	1,632E-04	99,5
6 – 8 seg	3,010E-04	29,5	2,193E-04	60,5	1,612E-04	99,5
8 – 10 seg	5,137E-04	29,5	8,681E-05	59,5	2,060E-04	100
Media	3,729E-04	29,7	1,048E-04	60	1,739E-04	99,5
Desviación típica	1,304E-04	0,45	7,055E-05	0,50	3,037E-05	0,35
		velocidad de giro		velocidad de giro*2		Red*2
Señal	a30n					
Tiempo de la muestra	Amplitud 1	Frecuencia 1 (Hz)	Amplitud 2	Frecuencia 2 (Hz)	Amplitud 3	Frecuencia 3 (Hz)
0 – 2 seg	5,878E-04	29	8,172E-05	60,5	2,669E-04	100,5
2 – 4 seg	6,914E-04	29	2,155E-05	60	1,264E-04	100,5
4 – 6 seg	9,408E-04	29,5	3,795E-05	59,5	2,363E-04	100,5
6 – 8 seg	8,404E-04	29	5,813E-05	60	2,195E-04	100,5
8 – 10 seg	8,514E-04	29	9,081E-05	59	2,932E-04	100,5
Media	7,824E-04	29,1	5,803E-05	59,8	2,285E-04	100,5
Desviación típica	1,409E-04	0,22	2,903E-05	0,57	6,369E-05	0,00
		velocidad de giro		velocidad de giro*2		Red*2
Señal	b30b					
Tiempo de la muestra	Amplitud 1	Frecuencia 1 (Hz)	Amplitud 2	Frecuencia 2 (Hz)	Amplitud 3	Frecuencia 3 (Hz)
0 – 2 seg	3,17E-002	23,5	2,711E-03	47,5	4,481E-03	59,5
2 – 4 seg	1,722E-02	23,5	2,353E-03	47	4,322E-03	59,5
4 – 6 seg	1,790E-02	23,5	1,040E-03	47	1,845E-03	59,5
6 – 8 seg	6,886E-02	23,5	6,635E-03	47,5	6,084E-03	59,5
8 – 10 seg	8,178E-02	23,5	6,906E-03	47	4,617E-03	59,5
Media	4,350E-02	23,5	3,929E-03	47,2	4,270E-03	59,5
Desviación típica	2,997E-02	0,00	2,669E-03	0,27	1,528E-03	0,00
		BSF/3		No identificada		velocidad de giro*
Señal	m30b					
Tiempo de la muestra	Amplitud 1	Frecuencia 1 (Hz)	Amplitud 2	Frecuencia 2 (Hz)	Amplitud 3	Frecuencia 3 (Hz)
0 – 2 seg	1,083E-02	23,5	1,989E-03	47,5	3,661E-03	59,5
2 – 4 seg	5,559E-04	23,5	7,737E-04	47,5	1,492E-03	59,5
4 – 6 seg	1,791E-02	23,5	1,274E-03	47,5	1,898E-03	59,5
6 – 8 seg	3,298E-02	23,5	2,173E-03	47	7,809E-03	59,5
8 – 10 seg	1,173E-03	23,5	4,065E-04	46	1,840E-03	59,5
Media	1,269E-02	23,5	1,323E-03	47,1	3,340E-03	59,5
Desviación típica	1,344E-02	0,00	7,600E-04	0,65	2,637E-03	0,00
		BSF/3		No identificada		velocidad de giro*
Señal	a30b					
Tiempo de la muestra	Amplitud 1	Frecuencia 1 (Hz)	Amplitud 2	Frecuencia 2 (Hz)	Amplitud 3	Frecuencia 3 (Hz)
0 – 2 seg	3,851E-03	23	5,015E-04	46	6,511E-04	58,5
2 – 4 seg	4,369E-03	23	3,912E-04	47	8,508E-04	58,5
4 – 6 seg	3,794E-03	23	5,606E-04	47	5,432E-04	58,5
6 – 8 seg	6,714E-03	23	1,749E-04	47,5	4,213E-04	58,5
8 – 10 seg	2,612E-03	23	2,259E-04	47,5	8,081E-04	58,5
Media	4,268E-03	23	3,708E-04	47	6,549E-04	58,5
Desviación típica	1,511E-03	0,00	1,680E-04	0,61	1,795E-04	0,00
		BSF/3		No identificada		velocidad de giro*



- ANEXOS -

Señal	b30i					
Tiempo de la muestra	Amplitud 1	Frecuencia 1 (Hz)	Amplitud 2	Frecuencia 2 (Hz)	Amplitud 3	Frecuencia 3 (Hz)
0 – 2 seg	9,56E-004	29,5	1,075E-03	103,5	2,569E-04	163
2 – 4 seg	1,292E-03	29,5	4,698E-04	103,5	2,378E-04	162,5
4 – 6 seg	1,406E-03	29,5	8,344E-04	103	2,050E-04	162
6 – 8 seg	1,375E-03	29,5	1,573E-03	102,5	4,676E-04	162
8 – 10 seg	1,205E-03	29,5	7,788E-04	102,5	3,946E-04	162
Media	1,247E-03	29,5	9,462E-04	103	3,124E-04	162,3
Desviación típica	1,803E-04	0,00	4,114E-04	0,50	1,129E-04	0,45
	velocidad de giro		BPTO		BPTI	
Señal	m30i					
Tiempo de la muestra	Amplitud 1	Frecuencia 1 (Hz)	Amplitud 2	Frecuencia 2 (Hz)	Amplitud 3	Frecuencia 3 (Hz)
0 – 2 seg	4,140E-04	29,5	2,497E-04	102	2,524E-04	161,5
2 – 4 seg	4,278E-04	29,5	1,600E-04	102	4,048E-04	161
4 – 6 seg	2,868E-04	29,5	1,312E-04	102	1,695E-04	161,5
6 – 8 seg	3,071E-04	29,5	1,445E-04	102,5	2,716E-04	161
8 – 10 seg	4,089E-04	30	1,782E-04	102	3,018E-04	161
Media	3,689E-04	29,6	1,727E-04	102,1	2,800E-04	161,2
Desviación típica	6,645E-05	0,22	4,647E-05	0,22	8,528E-05	0,27
	velocidad de giro		BPTO		BPTI	
Señal	a30i					
Tiempo de la muestra	Amplitud 1	Frecuencia 1 (Hz)	Amplitud 2	Frecuencia 2 (Hz)	Amplitud 3	Frecuencia 3 (Hz)
0 – 2 seg	3,016E-04	29,5	4,575E-05	102	3,010E-04	159
2 – 4 seg	1,170E-04	29,5	4,190E-05	102,5	7,986E-05	159
4 – 6 seg	4,767E-04	29,5	8,829E-05	101,5	3,494E-04	159
6 – 8 seg	5,117E-04	29,5	2,932E-05	102,5	3,469E-04	159
8 – 10 seg	3,551E-04	29,5	7,152E-05	103,5	3,431E-04	159
Media	3,524E-04	29,5	5,536E-05	102,4	2,841E-04	159
Desviación típica	1,572E-04	0,00	2,396E-05	0,74	1,159E-04	0,00
	velocidad de giro		BPTO		BPTI	
Señal	b30e					
Tiempo de la muestra	Amplitud 1	Frecuencia 1 (Hz)	Amplitud 2	Frecuencia 2 (Hz)	Amplitud 3	Frecuencia 3 (Hz)
0 – 2 seg	1,02E-003	59,5	2,923E-04	102	2,740E-04	161,5
2 – 4 seg	1,340E-03	59,5	5,210E-04	102	4,544E-04	161,5
4 – 6 seg	1,011E-03	59,5	2,096E-04	102	1,708E-04	161,5
6 – 8 seg	9,658E-04	59,5	7,265E-04	102	5,081E-04	161,5
8 – 10 seg	8,732E-04	59,5	1,879E-04	102	2,861E-04	161,5
Media	1,042E-03	59,5	3,875E-04	102	3,387E-04	161,5
Desviación típica	1,764E-04	0,00	2,309E-04	0,00	1,389E-04	0,00
	velocidad de giro*2		BPTO		BPTI	
Señal	m30e					
Tiempo de la muestra	Amplitud 1	Frecuencia 1 (Hz)	Amplitud 2	Frecuencia 2 (Hz)	Amplitud 3	Frecuencia 3 (Hz)
0 – 2 seg	1,986E-03	59,5	3,639E-04	106,5	4,522E-03	160,5
2 – 4 seg	3,194E-03	59,5	4,622E-04	107	4,459E-03	160,5
4 – 6 seg	1,431E-03	59,5	2,368E-04	107	4,014E-03	160,5
6 – 8 seg	9,475E-04	59,5	4,544E-04	107	3,884E-03	160,5
8 – 10 seg	1,162E-03	59,5	2,038E-04	107	2,647E-03	160,5
Media	1,744E-03	59,5	3,442E-04	106,9	3,905E-03	160,5
Desviación típica	8,989E-04	0,00	1,201E-04	0,22	7,554E-04	0,00
	velocidad de giro*2		BPTO		BPTI	
Señal	a30e					
Tiempo de la muestra	Amplitud 1	Frecuencia 1 (Hz)	Amplitud 2	Frecuencia 2 (Hz)	Amplitud 3	Frecuencia 3 (Hz)
0 – 2 seg	1,653E-04	59	9,051E-05	105	1,896E-04	159,5
0 – 2 seg	1,500E-04	58,5	5,157E-05	107	3,895E-05	159,5
4 – 6 seg	8,998E-05	58	6,849E-05	105,5	9,286E-05	159,5
6 – 8 seg	7,375E-05	59	3,811E-05	106,5	9,747E-05	161
8 – 10 seg	1,476E-04	60	7,852E-05	108,5	5,085E-05	158,5
Media	1,253E-04	58,9	6,544E-05	106,5	9,395E-05	159,6
Desviación típica	4,066E-05	0,74	2,091E-05	1,37	5,926E-05	0,89
	velocidad de giro*2		BPTO		BPTI	

